

Rapport

R22:1971

**Porositets- och luft-
flödesfaktorns inverkan
på förbrännings-
hastigheten vid brand
i slutet rum**

Leif Nilsson

Byggforskningen

Porositets- och luftflödesfaktorns inverkan på förbränningshastigheten vid brand i slutet rum

Leif Nilsson

För att en funktionellt underbyggd brandteknisk dimensionering av bärande och brandavskiljande konstruktioner skall kunna bli en realitet, fordras bl a en nyanterad kartläggning av det fullständiga brandförloppets karakteristika i brandcell vid varierande egenskaper för bränsle och omslutande väggar, golv och tak. Härvid är ett klarläggande av den under brandförloppet utvecklade energin per tidsenhet eller av tidsvariationen för bränslets förbränningshastighet fundamentalt för en bestämning av brandförloppets gastemperatur-tidkurva. Då den under förbränningen tillgängliga luftmängden samt brandbelastningens finfördelningsgrad och staplingstäthet i dominerande grad avgör denna energikutveckling eller förbränningshastighet, har en bestämning av dessa parametersamband hög prioritet.

I en försöksserie, genomförd vid institutionen för byggnadsstatik, LTH, har därför förbränningsstudier genomförts med det primära syftet att för träribbstapel i slutet brandcell med en fönsteröppning bestämma den kombinerade inverkan på förbränningshastigheten av karakteristika för brandrummets fönsteröppning och brandbelastningens porositetsfaktor. Förutom representativa värden på förbränningshastigheten, uttryckt som bränslets viktminskning per tidsenhet, har därvid också strålningskarakteristika samt brandrummets temperaturförhållanden kartlagts. Försöken har genomförts i varierande modellskala med en bestämning av skalfaktorn inkluderad.

För ett studium av ett brandförlopps karakteristika står för närvarande tre vägar öppna, nämligen modellförsök, fullskaleförsök samt teoretiska beräkningar över problemets värme- och massabalanskvationer. I Sverige pågående och under senare tid genomförd forskning inom området har i övervägande grad omfattat teoretiska beräkningar samt vissa grundläggande fullskaleförsök medan experimentella studier i modellskala hittills i vårt land genomförts endast i liten utsträckning.

Internationellt föreligger dock ett omfattande erfarenhetsunderlag från modellbränder i såväl det fria som i slutna rum. Av de modellbrandstudier, som redovisas i litteraturen, har i detta

sammanhang speciellt två huvudgrupper intresse.

Den ena huvudgruppen omfattar experimentell bestämning av sambandet mellan förbränningshastigheten R , redovisad som bränslets viktsminskning per tidsenhet, under ett brandförlopps flamfas och porositeten för en träribbstapel vid brand i det fria.

För en karakterisering av porositeten används därvid porositetsfaktorn Φ ($\text{cm}^{1,1}$), definierad genom sambandet

$$\Phi = N^{0,5} \cdot b^{1,1} \cdot \frac{A_v}{A_s} \quad (1)$$

med

$$A_s = 2nb \{2NL + b [N - n(N-1)]\} \quad (2)$$

$$A_v = (L - n \cdot b)^2 \quad (3)$$

I formlerna betecknar b (cm) tjockleken (kvadratisk tvärsnitt) och L (cm) längden av varje enskild träribba, n antalet ribbor per lager och N antalet lager av träribbstapeln, A_s den mot luften initieellt exponerade ytan av samtliga i stapeln ingående ribbor samt A_v den för vertikal luftcirkulation genom stapeln fria horisontalytan.

Den andra huvudgruppen av modellundersökningar omfattar bestämning av förbränningshastighetens beroende för brand i slutet rum av brandcellens öppningsfaktor, definierad enligt $A/\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$), eller alternativt luftflödesfaktor, definierad enligt $A/\sqrt{h}$ ($\text{m}^{5/2}$). Härvid betecknar A_t (m^2) den inre ytan av de väggar, golv och tak som avgränsar brandcellen från dess omgivning, A (m^2) brandcellens sammanlagda öppningsyta (fönster, dörrar, etc) samt h (m) ett med hänsyn till öppningarnas storlek vägt medelvärde av deras utsträckning i höjddled.

I litteraturen redovisas däremot ej någon systematisk undersökning av den kombinerade effekten på förbränningshastigheten vid förbränning av träribbstapel i slutet brandcell av variationer i såväl bränslets porositetsfaktor som brandcellens luftflödesfaktor. Av denna anledning har genomförts en större försöksserie, avseende brand i trämaterial (furu) i slutet brandcell med en fönsteröppning, för en belysning av den kombinerade inverkan på brandförloppets karakteristika, primärt förbränningshastigheten under flamfasen, av a) varierande porositetsfaktor Φ

Byggforskningen Sammanfattningar

R22:1971

Nyckelord:

brandteknisk dimensionering, brandförlopp, förbränningshastighet, gastemperatur-tid-kurva, skalfaktor

brandteknisk forskning, förbränningsstudier, modellförsök, förbränningshastighets-tidkurvor, temperatur-tidkurvor, strålningsintensitets-tidkurvor, skalfaktor

Rapport R22:1971 avser anslag C 479 från Statens råd för byggnadsforskning till Institutionen för Byggnadsstatik, LTH.

UDK 614.841.41

620.193.5

662.612

SfB A

Sammanfattning av :

Nilsson, L, 1971, *Porositets- och luftflödesfaktorns inverkan på förbränningshastigheten vid brand i slutet rum*. (Statens institut för byggnadsforskning) Stockholm. Rapport R22: 1971, 115 s., ill. 18 kr.

Rapporten är skriven på svenska med svensk och engelsk sammanfattning.

Distribution:

Svensk Byggtjänst
Box 1403, 111 84 Stockholm
Tfn 08-24 28 60

Abonnemangsgrupp: (k) konstruktion

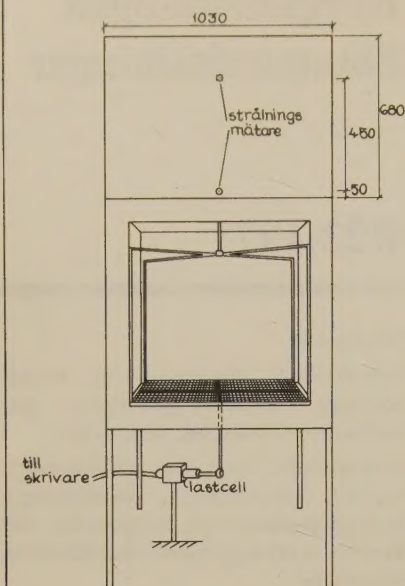


FIG. 1.

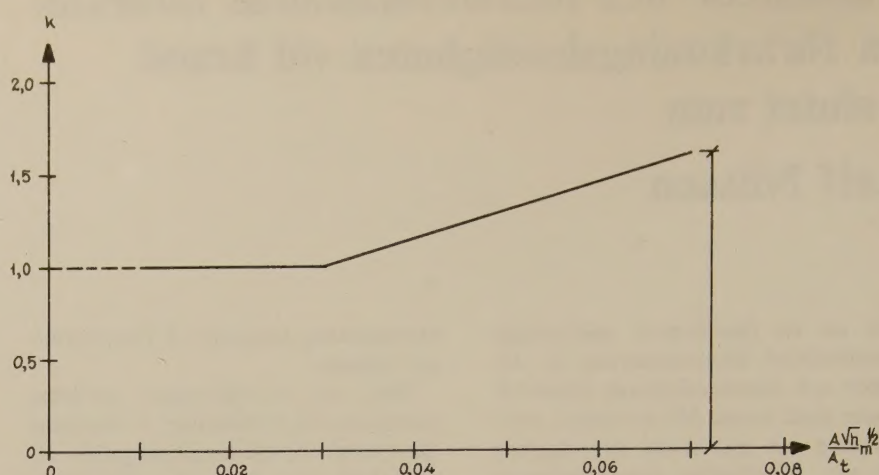


FIG. 2.

FIG. 1. Det vid undersökningen använda största modellbrandrummet, sett framifrån. Det i storlek mellanliggande modellbrandrummet är analogt utformat.

FIG. 2. Faktorn k 's variation med öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$ ($m^{1/2}$).

b) varierande luftflödesfaktor $A\sqrt{h}$ eller öppningsfaktor $A\sqrt{h}/A_t$ samt c) varierande skalfaktor.

Parallellt har vid försöksserien kontinuerligt registrerats brandcellens gastemperatur-tidkurva samt strålningen från flammor och rökgaser.

Försöksuppläggning

Försöksserien genomfördes i tre kubiska, med en fönsteröppning försedd, slutna modellbrandrum med de invändiga sidomått 500, 750 respektive 1000 mm. Samtliga brandceller utfördes med ett ytterhölje av stålplåt och en invändig beklädnad av 10 mm asbetsskiva (densitet 1,02 Mp/m^3).

För varje brandcell valdes sådana dimensioner på fönsteröppningarna, samtliga med kvadratisk sektion, att fem olika öppningsfaktorer $A\sqrt{h}/A_t$ erhöles, nämligen 0,020, 0,032, 0,040, 0,070 och 0,114 $m^{1/2}$, vilka tillsammans täcker ett brett, icke orealistiskt variationsområde.

Brandbelastningen utgjordes av ribbor av furu med kvadratisk tvärsnitt (25×25 mm²) och med så avpassad längd att en approximativt konstant brandbelastning av 2,0 kg trä per m² omslutningsyta erhöles. Vid undersökningen täckt variationsområde för brandbelastningens porositetsfaktor Φ är 0,025–1,092 $cm^{1,1}$ med träribbjockleken b hållen konstant=2,5 cm.

I undersökningen bestämdes förbränningshastigheten enligt experimentellt utbildad praxis som bränslets viktsförlust per tidsenhet. En sådan bestämning möjliggjordes genom kon-

tinuerlig vägning, med hjälp av en lastcell, av i brandcellen kvarvarande mängd bränsle.

I FIG. 1 visas en skiss representativ för de båda större modellbrandrummen sedda framifrån, av vilken också framgår utformningen av korgen i vilken bränslet staplades, systemet för bestämning av förbränningshastigheten och placeringen av två strålningsmätare.

Då kunskaper om brandförloppets gastemperatur-tidkurva är fundamentala dels i och för sig och dels för en planerad, framtida, approximativ teoretisk bestämning av till bränslets viktsminskning per tidsenhet hörande frigjord värmemängd vid varje enskild tidpunkt av brandförloppet, registrerades gastemperaturen kontinuerligt i 32 representativa mätpunkter i brandcellen och dess omslutande konstruktioner. Som temperaturgivare användes härvid oskyddade termoelement av typ Cromel-Alumel.

Resultat

På grundval av undersökningens omfattande mätvärdesunderlag har samband bestämts mellan:

- medelvärde av förbränningshastigheten under flamfasens aktiva del R_{80-30} (kg/min), porositetsfaktorn Φ ($cm^{1,1}$) och luftflödesfaktorn $A\sqrt{h}$ ($m^{5/2}$),
- i brandcellen uppmätt maximal gastemperatur θ_{max} ($^{\circ}C$), porositetsfaktorn Φ ($cm^{1,1}$) och öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$ ($m^{1/2}$),
- i brandcellen erhållet medelvärde

av gastemperaturen under flamfasens aktiva del θ_{80-30} ($^{\circ}C$), porositetsfaktorn Φ ($cm^{1,1}$) och öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$ ($m^{1/2}$).

För förbränningshastigheten R_{80-30} kan erhållna resultat approximativt sammanfattas genom sambandet:

$$R_{80-30} = \frac{1}{k} \left[(6,25\Phi + 3,53) \cdot A\sqrt{h} - 0,165\Phi + 0,153 \right] \quad (4)$$

vilket för Φ i $cm^{1,1}$ och $A\sqrt{h}$ i $m^{5/2}$ ger R_{80-30} i kg/min.

Multiplikatorn k bestäms ur FIG. 2.

Till ekv (4) hör följande bivillkor:

– Om luftflödesfaktorn $A\sqrt{h} < 0,0267$ $m^{5/2}$, bestäms förbränningshastigheten ur ekvationen

$$R = 9,25 A\sqrt{h},$$

– om porositetsfaktorn $\Phi < 0,1$ $cm^{1,1}$, bestäms förbränningshastigheten genom rätlinjig interpolation mellan punkterna ($\Phi=0$, $R=0$) och ($\Phi=0,1$ R bestämd ur ekv 4),

– om porositetsfaktorn $\Phi > 0,5$ $cm^{1,1}$, sätts $\Phi=0,5$,

– om öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t > 0,07$ $m^{1/2}$, ges förbränningshastigheten R av det mot $A\sqrt{h}/A_t=0,07$ $m^{1/2}$ svarande värdet på luftflödesfaktorn $A\sqrt{h}$.

Det är väsentligt att beakta, att i rapporten redovisade resultat är begränsat giltiga för vid undersökningen konstanthållna karakteristika för brandbelastningens storlek, enskild träribbas tjocklek samt uppbyggnad av brandcellens omslutande väggkonstruktioner.

The effect of the porosity and air flow factor on the rate of burning for fire in enclosed space

Leif Nilsson

In order to make a functionally based fire engineering design of load-bearing and separating structures it is necessary to make a careful investigation of the complete process of fire development in a fire cell for varying characteristics of fuel and enclosing walls, floor and ceiling. To be able to determine the gas temperature-time curve of the fire process it is fundamental to know the energy per unit time developed during the fire process or the time variation of the rate of burning of the fuel. As the quantity of air available during the combustion and the porosity and piling density of the fire load to a very high degree determine this development of energy or rate of burning, a determination of these parameter relations has high priority.

In a test series carried out at the Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, the Lund Institute of Technology, combustion studies have been carried out with the primary purpose of determining the combined influence of the characteristics of the window opening of the fire cell and the porosity factor of the fire load on the rate of burning, for a pile of wood cribs in an enclosed chamber with one window opening. Apart from obtaining representative values of the rate of burning, expressed as the weight loss of the fuel per unit time, an investigation has also been made of the characteristics of radiation and the temperature conditions of the fire cell. The tests have been carried out in a varying model scale including a determination of the scale factor.

At present there are three possible lines open for the study of the characteristics of the process of fire development, viz., model tests, full scale tests, and theoretical calculations of the heat and mass balance equations of the problem. Present and lately carried out research within this field in Sweden has, to a predominant degree, comprised theoretical calculations and certain basic full scale tests, while till now experimental studies in model scale has been carried out only to a small extent.

On an international level, however, there exists a relatively extensive experience of model fires in the open as well as in enclosed spaces.

In this context two principal groups

of the model fire studies accounted for in literature are of particular interest.

The first principal group comprises experimental determination of the relation between the rate of burning R , accounted for as the weight loss per unit time of the fuel, during the flame phase of the process of fire development and the porosity of a pile of wood cribs during fire in the open.

For a characterization of the porosity the porosity factor Φ ($\text{cm}^{1.1}$) is used, defined by the relation

$$\Phi = N^{0.5} \cdot b^{1.1} \cdot \frac{A_v}{A_t} \quad (1)$$

with

$$A_s = 2nb \{2NL + b [N - n(N-1)]\} \quad (2)$$

$$A_v = (L - nb)^2 \quad (3)$$

In the formulas b (cm) denotes the thickness (square cross-section) and L (cm) the length of every individual wood crib, n the number of cribs per layer and N the number of layers in the pile of wood cribs, A_s the surface area of all the cribs in the pile initially exposed to the air, and A_v the horizontal surface area open for vertical air flow through the pile.

The second principal group of model tests comprises a determination of how the rate of burning in an enclosed space varies with the opening factor of the fire cell, defined according to $A_v \bar{h} / A_t$ ($\text{m}^{1/2}$), or alternatively the air flow factor, defined according to $A_v \bar{h}$ ($\text{m}^{5/2}$). Here A_t (m^2) denotes the interior surface of the walls, floor and ceiling, which define the fire cell from its environment, A (m^2) the total opening area of the fire cell (windows, doors, etc.) and b (m) a mean value of the height of these openings, weighed with regard to the size of the openings.

However, in technical literature there is no systematic investigation of the combined effect of variations in both the porosity factor of the fuel and the air flow factor of the fire cell on the rate of burning for a pile of wood cribs in an enclosed fire cell. For this reason a fairly extensive test series has been carried out at the Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, the Lund Institute of Technology, concerning fire in wood material (fir) in an enclosed fire cell with one window opening. The purpose was to illustrate the combined influence on the characteristics of the fire process, primarily the rate

National Swedish Building Research Summaries

R22:1971

Key words:

structural fire engineering design, process of fire development, rate of burning, gas temperature-time curve, scale factor structural fire engineering research, combustion studies, model tests, rate of burning-time curves, temperature-time curves, intensity of radiation-time curves, scale factor

Report R22:1971 was supported by Grant C 479 from the Swedish Council for Building Research to the Division of Structural Mechanics and Concrete Construction at the Lund Institute of Technology.

UDC 614.841.41
620.193.5
662.612
SfB A

Summary of:

Nilsson, L., 1971, *Porositets- och luftflödesfaktorns inverkan på förbränningshastigheten vid brand i slutet rum*. The effect of the porosity and air flow factor on the rate of burning for fire in enclosed space. (Statens institut för byggnadsforskning) Stockholm. Rapport R22:1971, 115 p., ill. 18 Sw. kr.

The report is in Swedish with Swedish and English summaries.

Distribution:

Svensk Byggtjänst
Box 1403, S-111 84 Stockholm
Sweden

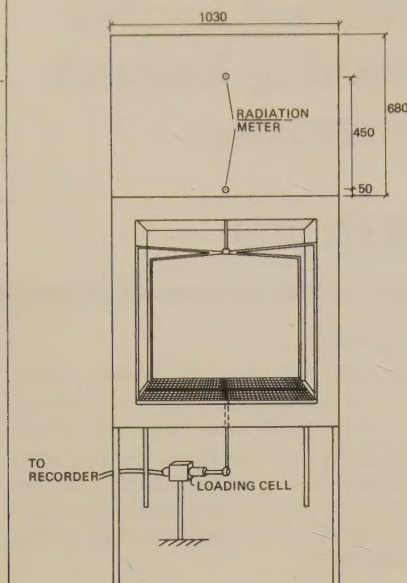


FIG. 1.

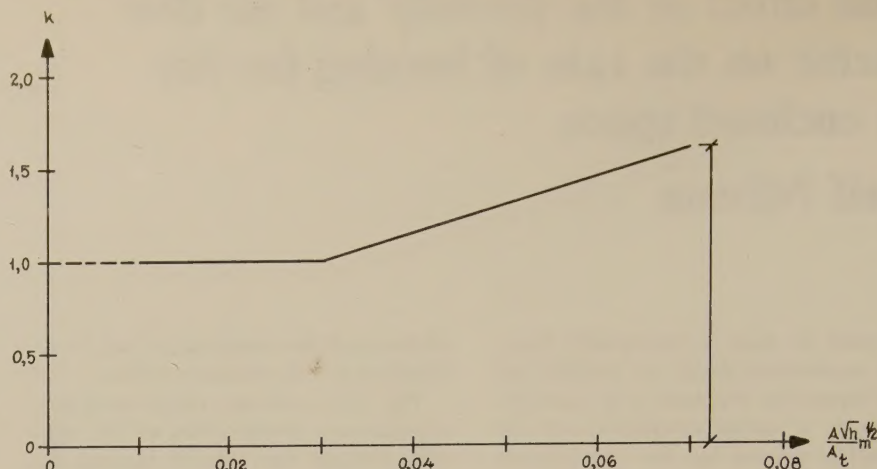


FIG. 2.

FIG. 1. The largest model chamber used at the test, seen from the front. The second-largest model chamber is designed in analogy with this one.

FIG. 2. Variation of factor k with opening factor $A\sqrt{h}/A_t$ ($m^{1/2}$).

of burning during the flame phase, of
a) varying porosity factor Φ
b) varying air flow factor $A\sqrt{h}$ or opening factor $A\sqrt{h}/A_t$, and
c) varying scale factor.

Simultaneously with the test series the gas temperature-time curve of the fire cell and the radiation of the flames and the smoke gases have been continuously recorded.

Test procedure and equipment

The test series was carried out in three cubical model chamber, each with one window opening. The interior walls measured 500, 750 and 1000 mm, respectively. All three chambers were provided with cover of sheet steel and an interior covering of 10 mm asbest board (density 1.02 Mp/m^3).

For each chamber window openings with square sections of such dimensions were chosen that five different opening factor-values $A\sqrt{h}/A_t$ were obtained viz., 0.020, 0.032, 0.040, 0.070 and 0.114 $m^{1/2}$. Together these values cover a wide, not unrealistic range of variation.

The fire load consisted of cribs of firwood with a square cross section (25×25 mm²) and with a length so fitted that an approximately constant fire load of 2.0 kg wood per m^2 bounding area was obtained. The range of variation covered in the investigation is for the porosity factor Φ 0.025–1.092 $cm^{1.1}$ with the thickness of the wood cribs kept constant=2.5 cm.

In the investigation the rate of burning was determined as the weight loss of the fuel per unit time, according to general praxis in experiments of this kind. Such

a determination was made possible by continuous weighing, by means of a loading cell, of the quantity of fuel left in the fire cell.

FIG. 1 is a representative sketch of the two larger model chambers seen from the front. The figure also shows the design of the basket in which the fuel was loaded, the system for the determination of the rate of burning and the location of two radiation meters.

As knowledge of gas temperature-time curve of the fire process is fundamental both in itself and for a planned, future, approximate theoretical determination of the quantity of released heat energy at every particular moment of the fire process, referring to the weight loss of the fuel per unit time, the gas temperature was continuously measured at 32 representative locations in the fire cell and its enclosing constructions. The temperatures were measured by means of unshielded chromel-alumel thermocouples.

Results

On the basis of the extensive measurements made during the investigation relations have been determined between:
— the mean rate of burning during the active part of the flame phase R_{80-30} (kg/min), the porosity factor Φ ($cm^{1.1}$) and the air flow factor $A\sqrt{h}$ ($m^{5/2}$),
— maximum gas temperature measured in the fire cell θ_{max} ($^{\circ}C$), the porosity factor Φ ($cm^{1.1}$) and the opening factor $A\sqrt{h}/A_t$ ($m^{1/2}$),
— the mean value of the gas temperature obtained in the fire cell during the active

part of the flame phase θ_{80-30} ($^{\circ}C$), the porosity factor Φ ($cm^{1.1}$) and the opening factor $A\sqrt{h}/A_t$ ($m^{1/2}$).

For the rate of burning R_{80-30} the obtained results can be approximately summed up in the relation:

$$R_{80-30} = \frac{1}{k} \left[(6.25\Phi + 3.53)A\sqrt{h} - 0.165\Phi + 0.153 \right] \quad (4)$$

which for Φ in $cm^{1.1}$ and for $A\sqrt{h}$ in $m^{5/2}$ gives R_{80-30} in kg/min.

The multiplier k is determined from FIG. 2.

The following sub-conditions belong to equation (4):

— If the air flow factor $A\sqrt{h} < 0.0267$ $m^{5/2}$, the rate of burning is determined from the equation

$$R = 9.25 A\sqrt{h},$$

— if the porosity factor $\Phi < 0.1$ $cm^{1.1}$ the rate of burning is determined by means of linear interpolation between the points ($\Phi=0$, $R=0$) and ($\Phi=0.1$, R determined from equ. 4);

— if the porosity factor $\Phi > 0.5$ $cm^{1.1}$, then $\Phi=0.5$,

— if the opening factor $A\sqrt{h}/A_t > 0.07$ $m^{1/2}$ the rate of burning R is given by the value of the air flow factor $A\sqrt{h}$ corresponding to $A\sqrt{h}/A_t=0.07$ $m^{1/2}$.

It must be emphasized that the following characteristics have been kept at constant values during the investigation, viz., the size of the fire load, the thickness of the individual wood crib and the design of the wall constructions enclosing the fire cell, and that this fact limits the validity of the results accounted for in this report.

POROSITETS- OCH LUFTFLÖDESAKTORNS INVERKAN PÅ
FÖRBRÄNNINGSHASTIGHETEN VID BRAND I SLUTET RUM

THE EFFECT OF THE POROSITY AND AIR FLOW FACTOR
ON THE RATE OF COMBUSTION FOR FIRE IN ENCLOSED SPACE

av Leif Nilsson

Denna rapport avser anslag C 479 från Statens råd för byggnadsforskning till Institutionen för Byggnadsstatik, LTH. Författare är tekn.lic. Leif Nilsson. Intäkterna tillfaller fonden för byggnadsforskning.

Statens institut för byggnadsforskning, Stockholm
Rotobekman AB, Stockholm 1971 10 9022 1

FÖRORD

I föreliggande rapport redovisas resultat från en experimentell undersökning av inverkan på brandförloppet av vissa karakteristika för brandbelastning och brandcell.

Arbetet har genomförts vid institutionen för Byggnadsstatik vid Lunds tekniska högskola med professor Ove Pettersson som handledare. Till honom vill jag framföra ett varmt tack för personligt stöd och värdefull stimulans under detta arbetes tillkomst.

Därutöver vill jag rikta ett varmt tack till samtliga de medarbetare inom institutionen som bidragit till försökens genomförande, till fru Lena Svensson som svarat för manuskriptet och fröken Yvonne Fransson som ritat samtliga figurer.

Lund i februari 1971

Leif Nilsson

I have been thinking much lately of the old days
and the many friends who have passed away.
It seems so long ago now.

Those who have been with me through the years
and who have seen me through the storm
and the sun, they are the ones
who have made my life so sweet.

And now, when I am old and gray
and my strength is waning,
I think of those who have gone
and how I shall miss them.

Yours truly,
John Doe

John Doe

INNEHÅLL

1.	INTRODUKTION	7
1.1	Problemställning	7
1.2	Möjligheter för brandförloppsstudier i modellskala	10
1.3	Undersökningens syfte och omfattning.	11
2.	REDOVISNING AV FÖRSÖKSUPPSTÄLLNING	20
3.	MÄTPROGRAM, MÄTNING, REGISTRERING	30
3.1	Mätprogrammets omfattning	30
3.2	Bestämning av förbränningshastigheten	30
3.3	Temperaturregistrering	33
3.4	Strålningsmätningar	35
4.	FÖRSÖSKARAKTERISTIKA	39
4.1	Försökens allmänna uppläggning	39
4.2	Brandbelastning	39
4.3	Antändning	54
5.	REDOVISNING AV FÖRSÖKSRESULTAT, DISKUSSION	56
5.1	Försöksresultat. Allmänt	56
5.2	Förbränningshastighet	58
5.3	Temperaturkaraktistika	76
5.4	Strålningskaraktistika	83
5.5	Skalfaktorn	84
5.6	Brandvaraktighet. Exemplifierande jämförelse med normer	85
5.7	Resultatredovisning (fig. 25-43)	89
	LITTERATUR	109
	CAPTION	111

1.1 Problemställning

Vid brand i en brandcell erhållet brandförlopp och dess beroende av olika faktorer är, trots de senaste årens intensifierade forskningsarbete, ännu ej på långt när klarlagda. Även återstår många olösta problem vad gäller under brandförloppet erhållen termisk påverkan på omslutande och inneslutna byggnadskonstruktioner. Förhållandet har som konsekvens medfört att den i dag normalt tillämpade tekniken vid en brandteknisk dimensionering av en byggnad eller byggnadsdel, såväl nationellt som internationellt, i betydande utsträckning fortfarande bygger på resultat av onyanserade provningar enligt ett standardiserat förfarande. Detta förfarande innebär, att konstruktionen utsätts för en upphettning, där gastemperatur-tidförloppet är entydigt fixerat och upphettningens längd bestäms av den vid brandens början tillgängliga bränslemängden, den s.k. brandbelastningen. Det föreskrivna temperatur-tidförloppet varierar obetydligt i olika länders normer och inom ISO (International Organization for Standardization) har en fastlåst temperatur-tidkurva antagits, fig 1, bl.a. som grund för den till klassificering ledande provningsverksamheten av byggnadsdelars brandmotstånd.

En på sådana grunder baserad, övervägande föreskrifts- och rekommendationsmässig, brandteknisk dimensionering står i stark obalans till för närvarande konventionellt tillämpat dimensioneringsförfarande för statisk och dynamisk last. Hög prioritet har därför en utveckling av en mera kvalificerad brandteknisk dimensionering, som utöver brandbelastningens storlek beaktar också övriga i sammanhanget väsentliga faktorer - brandbelastningens fördelning i brandcellen, brandcellens öppningsfaktor, inneslutna och omslutande konstruktioners termiska egenskaper, brandpåverkad konstruktions arbetsspänning, tvångskrafter, brotttyp etc.

För att en mera funktionellt riktig brandteknisk dimensionering skall bli möjlig, varvid det skönjbara målet är att för en given konstruktions- eller byggnadsutformning i det enskilda fallet kunna förutsäga de temperaturer och det brandmotstånd som kan förväntas vid en brand, fordras ett omfattande systematiskt forskningsarbete. Planerade, pågående eller redan avslutade forskningsarbeten

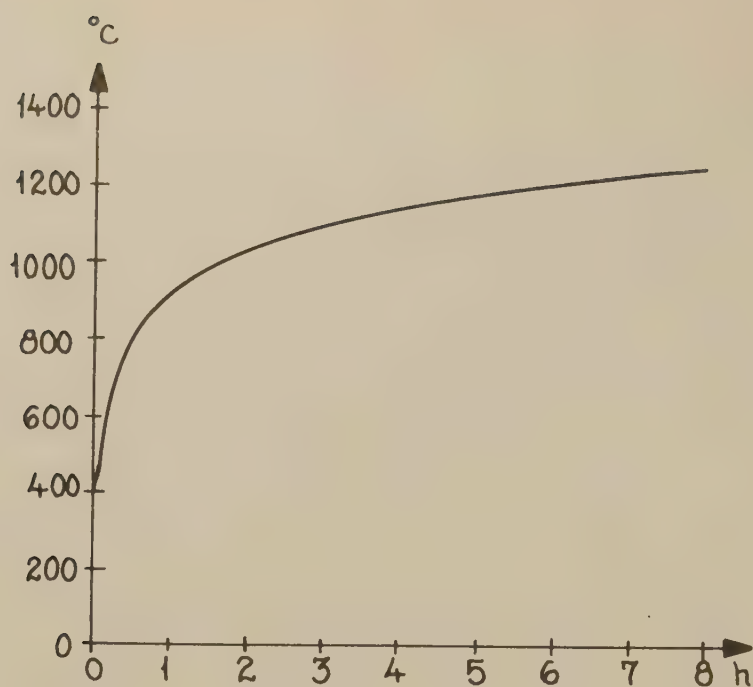


FIG 1 Gastemperatur-tidsamband vid brandprovning enligt standardiserat förfarande.

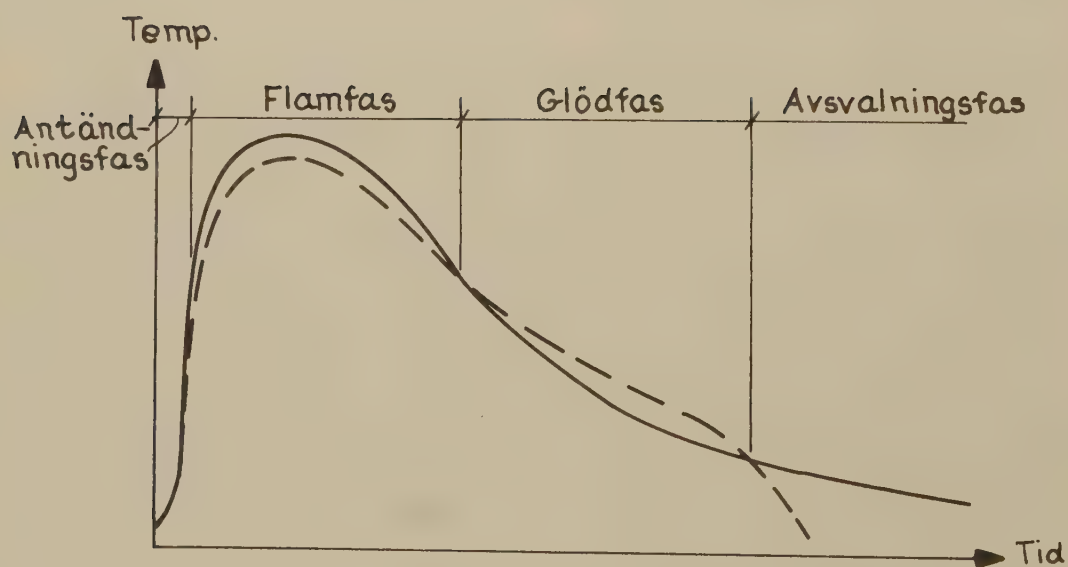


FIG 2 Brandförloppets huvudfaser, karakteriserade genom tidkurvorna för brandrumstemperaturen (—), bestämd med termoelement i skyddsrör, och för strålningstemperaturen (---).

inom området kan i stort sorteras in i någon eller några av följande huvudgrupper, vilka samtidigt utgör väsentliga etapper i en kvalificerad brandteknisk dimensionering av bärande konstruktioner /1/

a) karakterisering av en brandcells brandbelastning för vanligen förekommande typer av byggnader och lokaler (bostäder, kontor, skolor, sjukhus, varuhus, bibliotek etc),

b) studium av energiutveckling, erforderlig lufttillförsel och produktion av gaser vid ett brandförlopp samt bestämning för fullständigt brandförlopp av i brandcellen erhållen rök-gastemperatur som funktion av tiden,

c) bestämning av termiska egenskaper hos vanligen förekommande konstruktionsmaterial inom hela det vid en brand aktuella temperaturområdet,

d) bestämning av de instationära temperaturfält, som vid en enligt b) given tidkurva för rök-gastemperaturen uppkommer i en brandpåverkad konstruktion samt

e) bestämning av statiskt verknings sätt och bärförmåga för en belastad och brandpåverkad konstruktion med utgångspunkt från beräknade temperaturfält enligt d) och med kännedom om tillhörande förändringar i materialens hållfasthets- och deformationsegenskaper.

Ett klarläggande av den under brandförloppet utvecklade energin per tidsenhet eller av tidsvariationen för bränslets förbränningshastighet är fundamentalt för en bestämning av brandförloppets gastemperatur-tidkurva och varaktighet. Då den under förbränningen tillgängliga luftmängden samt brandbelastningens finfördelningsgrad och staplingstäthet i dominerande grad avgör denna energiutveckling eller förbränningshastighet, har ett klarläggande av dessa parametersamband bedömts ha hög prioritet.

I en försöksserie, genomförd vid institutionen för byggnadsstatik, LTH, har därför förbränningsstudier genomförts med det primära syftet att för träribbstapel i slutna brandcell med en fönsteröppning bestämma den kombinerade inverkan på förbränningshastigheten av karakteristika för brandrummets fönsteröppning och brandbelastningens porositetsfaktor. Förutom representativa värden på förbränningshastigheten, uttryckt som bränslets viktsminskning per

tidsenhet, har därvid också strålningskarakteristika samt brandrum-mets temperaturförhållanden kartlagts. Försöken har genomförts i varierande modellskala med en bestämning av skalfaktorn inkluderad.

1.2 Möjligheter för brandförloppsstudier i modellskala

För ett studium av ett brandförlopps karakteristika står för närvarande tre vägar öppna, nämligen modellförsök, fullskaleförsök samt teoretiska beräkningar över problemets värme- och massabalansekvationer. I Sverige pågående och under senare tid genomförd forskning inom området har i övervägande grad omfattat teoretiska beräkningar samt vissa grundläggande fullskaleförsök medan experimentella studier i modellskala hittills i vårt land genomförts endast i liten utsträckning /2/.

Internationellt föreligger dock ett relativt omfattande erfarenhetsunderlag från modellbränder i såväl det fria som i slutna rum. Erfarenheterna indikerar för vissa problemställningar god framkomlighet via modellstudier vad gäller brandförloppets flamfas. För brandförloppets övriga faser - antändnings-, glöd- och avsvalningsfas, jfr fig 2 - är frågan om möjligheter för brandförloppsstudier i modellskala öppen till följd av extremt knapphändigt underlag.

För att resultat från modellförsöken skall kunna översättas till tillämpning för praktikens fullskaleförhållanden fordras, att modellförsöken genomföres med modellagarna satisfierade.

Modellagarna, erforderliga för en fullständig karakterisering av ett brandförlopp, är av komplicerad natur och i dagens läge ej i full utsträckning klarlagda. Sålunda kan nämnas att Faure /3/ för de modellagar, som bestämmer konvektionsförhållandena kring en brandkälla anger inte mindre än nio parametrar, nämligen Reynolds, Schmidts, Prandtls, Machs, Froudes, Damköhlers första och Damköhlers tredje tal samt ytterligare två dimensionslösa storheter, vilka inbördes måste vara lika i modell- och fullskala, för att överensstämmelse skall råda i termiskt, dynamiskt och kemiskt avseende.

Vid brandförloppsstudier med begränsad målsättning bortfaller ett flertal av det allmänna fallets parametrar vid modellagarnas tillämpning /4/. Så ger t.ex. den ordinärt dominerande turbulensen under

ett brandförlopps flamstadium för de flammor och heta gaser, som vid frånvaro av yttre påtvingat tryck alstras vid en brand, en långtgående förenkling av modellagarna till att omfatta som approximativt enda krav, att Froudes tal,

$$N_{FR} = \frac{u^2}{gL} \left(\frac{\rho}{\Delta\rho} \right) \quad (1)$$

med

u = en karakteristisk hastighet

L = en karakteristisk längdstorhet

$\frac{\Delta\rho}{\rho}$ = en karakteristisk, relativ viktsändring

g = tyngdkraftsaccelerationen

skall vara detsamma för modellförsök och för reell fullskaleprototyp.

Mot den angivna bakgrunden i kombination med kostnadshänsyn framstår systematiska modellundersökningar som ett lämpligt förfaringsätt för en kartläggning av enskild parameters inverkan på ett brandförlopps flamfas. Kombinerade med teoretiska beräkningar över problemets värme- och massabalansekvationer samt enstaka utslagsgivande fullskaleförsök för en konfirmering av att i modellskala erhållna värden översatta till fullskaleförsök är riktiga, bör detta till en rimlig kostnad kunna ge fruktbara resultat.

1.3 Undersökningens syfte och omfattning

Av de modellbrandstudier, som redovisats i litteraturen, har i detta sammanhang speciellt två huvudgrupper intresse.

Den ena huvudgruppen omfattar experimentell bestämning av sambandet mellan förbränningshastigheten R under ett brandförlopps flamfas och porositeten för en träribbstapel vid brand i det fria.

För en karakterisering av en träribbstapels porositet inför Gross /5/ porositetsfaktorn ϕ , definierad genom sambandet

$$\phi = N^{0,5} \cdot b^{1,1} \cdot \frac{A_v}{A_s} \quad (2)$$

med

$$A_s = 2nb \left\{ 2NL + b [N-n(N-1)] \right\} \quad (3)$$

$$A_v = (L-n \cdot b)^2 \quad (4)$$

I formeln betecknar b tjockleken (kvadratisk tvärsnitt) och L längden av varje enskild träribba, n antalet ribbor per lager och N antalet lager av träribbstapeln, A_g den mot luften inriktad yta av samtliga i stapeln ingående ribbor samt A_v den för vertikal luftströmning genom stapeln fria horisontalytan.

Som exemplifiering av genom modellförsök framtagna flamstadiekaraktäristika återges i fig 3 av Gross /5/ erhållna resultat vid studium av förbränningshastigheten hos träbränsle vid brand i det fria. Figuren ger experimentellt upptaget samband mellan förbränningshastigheten R i % per s under den del av flamfasen, för vilken förbränningshastigheten är approximativt konstant, och porositetsfaktorn ϕ för kvadratisk träribbstapel med sidlängden $10b$ där b betecknar enskild ribbas tjocklek. Med hänsyn till modellskala och variationer i träslag har därvid förbränningshastigheten givits under den modifierade formen $FRb^{1,6}$, där faktorn F = kvoten mellan temperaturledningstalen för Douglasgran, som använts för huvuddelen av försöken, och aktuellt träslag.

Av figuren framgår, att tre olika stadier kan särskiljas, nämligen

- a) en begränsad förbränning, med approximativt linjärt samband mellan skalmodifierad förbränningshastighet och porositetsfaktor,
- b) en fullständig förbränning, där den skalmodifierade förbränningshastigheten är oberoende av porositetsfaktorn och
- c) vid porositetsfaktorn $> \text{cirka } 0,4 \text{ cm}^{1,1}$, dvs vid mycket öppen träribbstapel, en icke fortgående förbränning.

Då i figuren återgivna flamstadiekaraktäristika erhållits för i det fria försiggående förbränning, har under hela brandförloppet den av träribborna exponerade ytan samt stapelns skorstensarea varit ensamt bestämmande för förbränningshastigheten. Vid brand i slutna brandcell med fönsteröppning kommer erhållna karaktäristika att bli annorlunda och normalt beroende av såväl träribbstapelns porositetsfaktor som storlek och form av fönsteröppningen, vilken begränsar den för förbränningen tillgängliga lufttillförseln. Vid extremt stor fönsteröppning torde dock förhållandena för en brand i en slutna brandcell närma sig de förhållanden som gäller för en brand i det fria med de differenser, som kan orsakas av skiljaktigheter i förbränningsluft- och rökgasströmning genom träribbstapeln i de båda fallen.

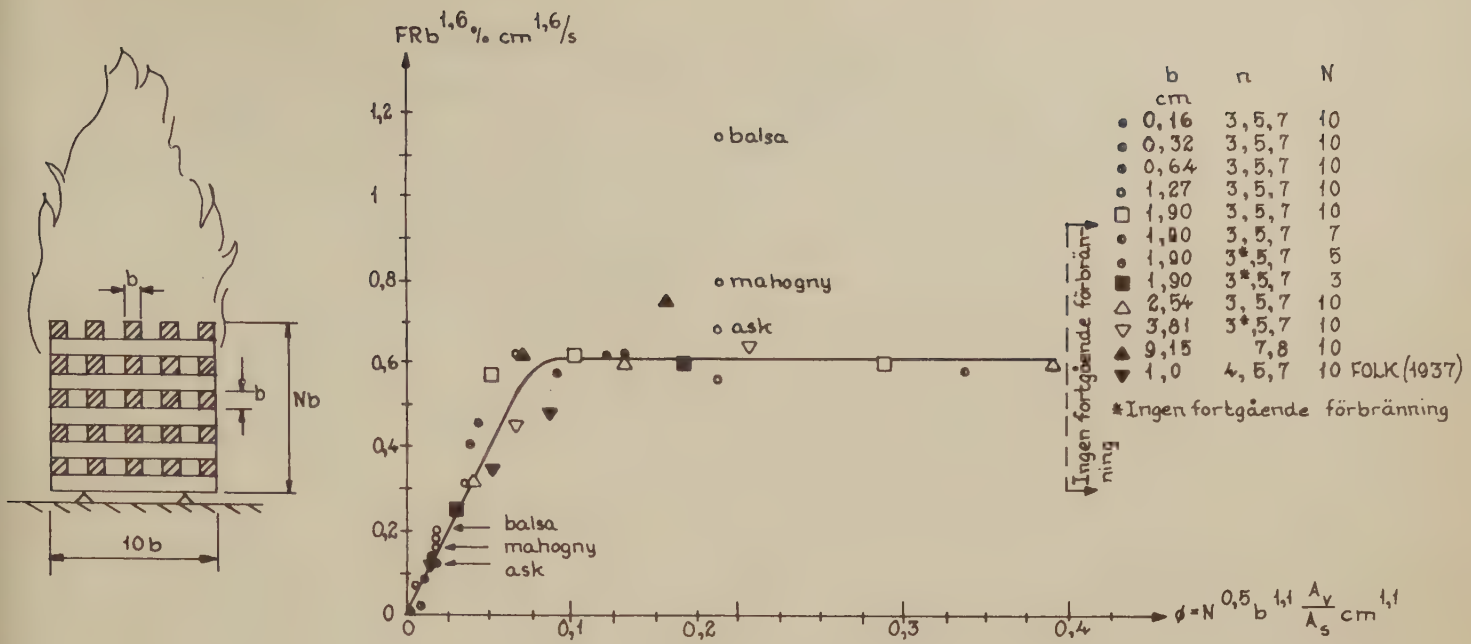


FIG 3 Experimentellt bestämt samband mellan skalmodifierad förbränningshastighet $FRb^{1,6}$ och för träribbstapeln karakteristisk porositetsfaktor ϕ vid i det fria försiggående förbränning av kvadratisk träribbstapel /5/.

Den andra i litteraturen redovisade huvudgruppen av modellundersökningar av i detta sammanhang särskilt intresse omfattar bestämning av förbränningshastighetens beroende för brand i slutet rum av brandcellens öppningsfaktor, definierad enligt $\frac{A\sqrt{h}}{m}^{1/2}$, eller alternativt luftflödesfaktor, definierad enligt $\frac{A_t}{A\sqrt{h}} m^{5/2}$. Härvid betecknar A_t (m^2) den inre ytan av de väggar, golv och tak som avgränsar brandcellen från dess omgivning, A (m^2) brandcellens sammanlagda öppningsyta (fönster, dörrar etc) samt h ett med hänsyn till öppningarnas storlek vägt medelvärde av deras utsträckning i höjddled.

Ett stort antal utförda försök i modell- och fullskala med träbränder i slutet rum med fönsteröppning visar, att medelförbränningshastigheten R för flamfasens aktiva del approximativt följer sambandet

$$R = k \cdot A \cdot \sqrt{h} \quad (5)$$

där k är en konstant, jfr t.ex. /6/ - /11/.

En sammanfattande översikt av publicerade resultat från amerikanska, danska, engelska, japanska och ryska försök ges i /11/, i vilken konstateras att k för normala förhållanden ligger i eller kring området 5,5 - 6 vid R i kg trä per minut samt A och h i m^2 respektive m . Som begränsande villkor ges därvid dels att förefintlig bränslemängd skall vara tillräcklig för övertändning och dels att brandcellens öppningsyta skall ligga inom området $\frac{1}{10} - \frac{1}{4}$ av tillhörande väggyta. Det framgår vidare av översikten, att vid mycket liten öppningsyta kan k stiga till värden inom området 9-10 kg/min $\cdot m^{5/2}$.

Som mera detaljerad illustration till problemet återges i fig 4 av Gross och Robertson experimentellt upptaget samband mellan förbränningshastigheten R (g/s) och luftflödesfaktorn $A\sqrt{h}$ ($m^{5/2}$) vid brandbelastning av träbränsletyp i tre till dimensionen olika brandceller med volymen $9,1 \cdot 10^3$, $2,2 \cdot 10^5$ respektive $6,5 \cdot 10^6$ cm^3 /9/. Som framgår av figuren, ligger samtliga erhållna värden relativt väl samlade längs en rät linje.

För en ytterligare belysning av genom ekvation (5) givet samband återges i fig 5 av Kawagoe sammanställda från ett stort antal försök erhållna samband mellan förbränningshastigheten och luftflödesfaktorn /10/. Refererade resultat omfattar såväl modell- som

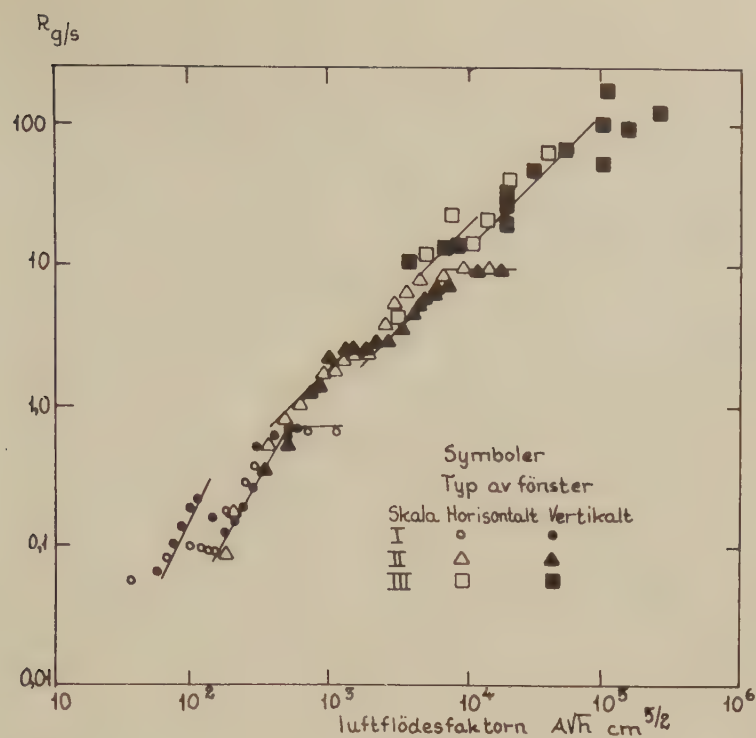
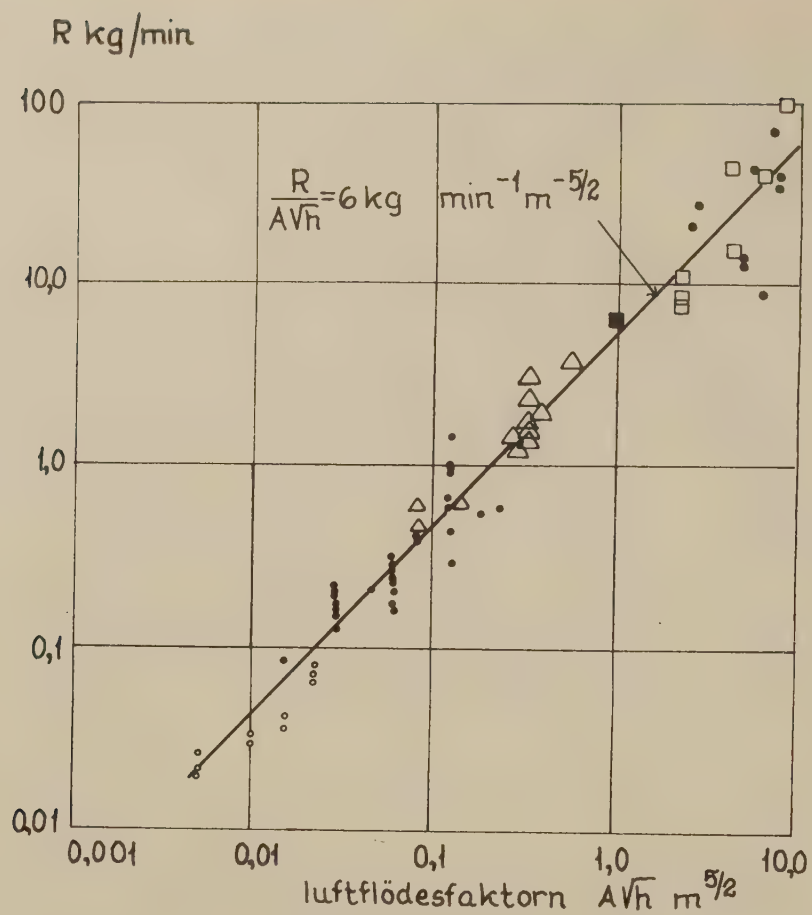


FIG 4 Experimentellt bestämt samband mellan förbränningshastigheten R (g/s) och luftflödesfaktorn $A\sqrt{h}(\text{cm}^{5/2})$ för tre till dimensionen olika modellbrandrum med en fönsteröppning /9/.



Experiment	Golv yta		Symbol
	ft ²	m ²	
J.F.R.O.	1	0,097	•
	4	0,37	•
	9	0,83	△
J.F.R.O.	34	3,2	■
J.F.R.O.	100	9,0	•
Kawagoe	11	1,0	△
	≈ 100	≈ 9,0	□

FIG 5 Samband mellan förbränningshastigheten R (kg/min) och luftflödesfaktorn $A\sqrt{h}$ ($\text{m}^{5/2}$), bestämt för ett mycket stort antal försök med träbrand i slutet rum i varierande skala /10/.

fullskaleundersökningar i brandceller med en golvyta, som täcker variationsområdet från 0.097 m^2 till 9 m^2 . Sammanställningen ger en avsevärd spridning kring den räta linjen $R = 6 \sqrt{h}$, speciellt vid höga värden på luftflödesfaktorn, där differenser av storleksordningen en tiopotens kan konstateras. Den stora spridningen indikerar, att förbränningshastigheten R utöver av luftflödesfaktorn $\sqrt{h} \text{ m}^{5/2}$ på ett icke försumbart sätt måste vara avhängig också av andra influenser. En väsentlig sådan influens bör bränslets porositetsfaktor vara, vilket klart verifieras genom föreliggande rapport. Andra ur förbränningsteknisk synpunkt tänkbara inverkningsfaktorer utgör t.ex. brandcellens geometri, omslutande konstruktioners termiska egenskaper, bränslemängd, initial fukthalt för bränslet samt bränslets placering i brandcellen.

I litteraturen redovisas, författaren veterligt, ej någon mera omfattande systematisk undersökning av den kombinerade effekten på förbränningshastigheten vid förbränning av träribbstapel i slutna brandcell av variationer i såväl bränslets porositetsfaktor som brandcellens luftflödesfaktor. Av denna anledning har vid institutionen för byggnadsstatik, LTH, genomförts en större försöksserie, avseende brand i trämaterial (furu) i slutna brandcell med fönsteröppning, för en belysning av inverkan på brandförloppets karakteristika, primärt förbränningshastigheten under flammfasen, av

- a) varierande porositetsfaktor ϕ
- b) varierande öppningsfaktor $\frac{\sqrt{h}}{A_t}$ samt
- c) varierande skalfaktor

Parallellt har vid försöksserien kontinuerligt registrerats brandcellens gastemperatur-tidkurva samt flammors och rökgasers strålningsintensitet.

För att därvid i ett inledande skede begränsa antalet övriga, i sammanhanget aktuella parametrar har här endast behandlats kubiska brandrum med en fönsteröppning. Vidare har vid samtliga försök brandbelastningen per m^2 omslutningsyta av brandcellen approximativt hållits konstant.

Till den senare influensen må här följande summariska kommentar göras. Om bränslemängden ökas vid bibehållna öppnings- och porositetsfaktorer kommer tillgången av luft per ytenhet av bränslet att

minska, vilket motverkar effekten av den med tillväxt i bränslemängd ökade exponerade ytan. Detta medför att för en viss bränslemängd förbränningshastigheten bör uppnå ett övre gränsvärde och att vid ytterligare ökande bränslemängd brandvaraktigheten kan förväntas tillväxa ungefär proportionellt mot denna.

För en punktmässig belysning av hur en varierande mängd bränsle påverkar brandförloppet i en brandcell återges i fig 6 av Ödeen/12/ vid fullskaleförsök experimentellt upptagna samband mellan å ena sidan bränslemängden M uttryckt i Mcal, och å andra sidan dels gastemperaturen i $^{\circ}\text{C}$ och dels ytterligare två brandförloppsskarakteriserande storheter A_{fl} och A_{gl} , definierade som innesluten yta mellan temperatur-tidkurvan $\theta-t$ och tidsaxeln t inom området $t=0$ till t , svarande mot $\frac{1}{2} \theta_{\max}$ respektive $\frac{1}{4} \theta_{\max}$ på temperaturtidkurvans nedåtgående del. Approximativt markerar därvid dessa båda sistnämnda tidpunkter slutet av brandförloppets flamstadium respektive glödstadium. De i figuren sammanställda värdena omfattar resultat från försök vid förbränningsluftflöde, som markerar övergång till fullständig förbränning. Det framgår att under denna förutsättning ger en ökning av brandcellens sammanlagda bränslemängd inom studerat område en kontinuerlig tillväxt av A_{fl} , A_{gl} och $\theta_{\max}$ varvid för maximala rök-gastemperaturen en avslutning till ett övre gränsvärde indikeras.

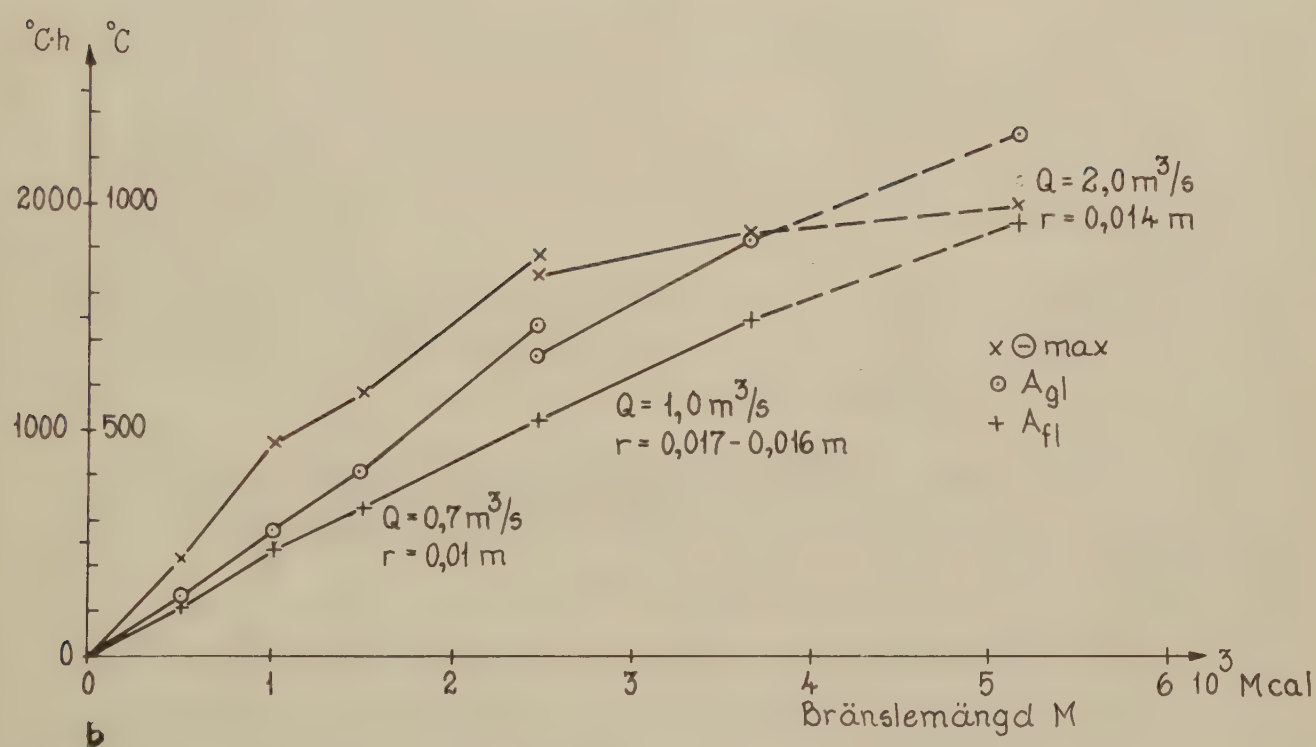
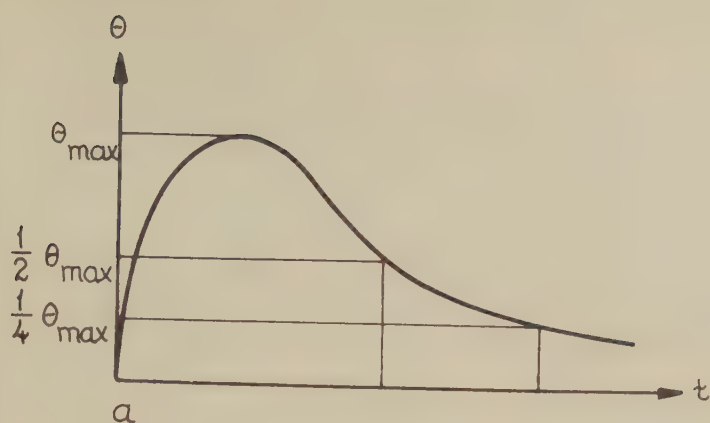


FIG 6 a) Brandförloppets temperatur-tidkurva, definierande maximal gastemperatur $\Theta_{\max}$ samt gastemperaturvärdena $\frac{1}{2} \Theta_{\max}$ och $\frac{1}{4} \Theta_{\max}$ för kurvans nedåtgående del.

b) Variationen av $\Theta_{\max}$, A_{fl} och A_{gl} med sammanlagd bränslemängd /12/.

2. REDOVISNING AV FÖRSÖKSUPPSTÄLLNING

Med hänsyn till att i undersökningen skulle ingå en bestämning av skalfaktorn, var önskemålet vid planeringen av försöksserien ett antal till geometri lika men till storlek olika modellbrandrum. Kombinerat med kravet på rimliga dimensioner av brandrummen - dikterat av dels att försöken skulle genomföras inomhus och dels att vid försöken förbrukad bränslemängd, trots ett stort antal försök, ur ekonomisk synpunkt skulle vara rimlig - ledde detta till val av tre kubiska slutna modellbrandrum med en fönsteröppning och med de invändiga sidomåtten 500, 750 respektive 1000 mm. Samtliga brandceller utfördes med ett ytterhölje av 1,5 - 2 mm stålplåt och en invändig beklädnad av 10 mm asbestskiva (densitet $1,02 \text{ Mp/m}^3$).

I fig 7 visas en skiss och i fig 8 ett foto, representativa för de båda större brandrummen sedda framifrån, av vilka också framgår utformningen av korgen i vilken bränslet staplades, systemet för bestämning av förbränningshastigheten, uttryckt som brandbelastningens viktsminskning per tidsenhet och placeringen av två strålningsmätare.

Analogt ger fig 9 en representativ sidovy av de båda större brandrummen, av vilken förutom de tre strålningsmätarnas placering även termoelementens anslutningskablar framgår.

I fig 10 visas en skiss av den lilla brandcellen, varav bl a framgår, att för denna brandcell ett modifierat förfarande använts vid bestämningen av förbränningshastigheten.

Då i undersökningen en bestämning av öppningsfaktorns inverkan på förbränningshastigheten ingick som väsentlig del, gjordes fronten till varje brandrum utbytbar. Till varje brandcell valdes sådana dimensioner på fönsteröppningarna, samtliga med kvadratisk sektion, att fem olika öppningsfaktorvärden erhöles, nämligen 0,020, 0,032, 0,040, 0,070 och $0,114 \text{ m}^{1/2}$. Valet av öppningsfaktorer dikterades därvid av följande överväganden. Önskvärdheten av ett möjligast brett, icke orealistiskt variationsområde för öppningsfaktorn ledde till som lägsta värde $0,020 \text{ m}^{1/2}$ och som högsta värde $0,114 \text{ m}^{1/2}$, vilket svarar mot helt öppen front i lilla brandcellen. Öppningsfaktorn $0,040 \text{ m}^{1/2}$ gavs ur förhållandet, att till denna hörande brandförlopp har ett gastemperatur - tid - karakteristikum, som ligger i närheten av det, som normmässigt föreskrivs för till klassificering

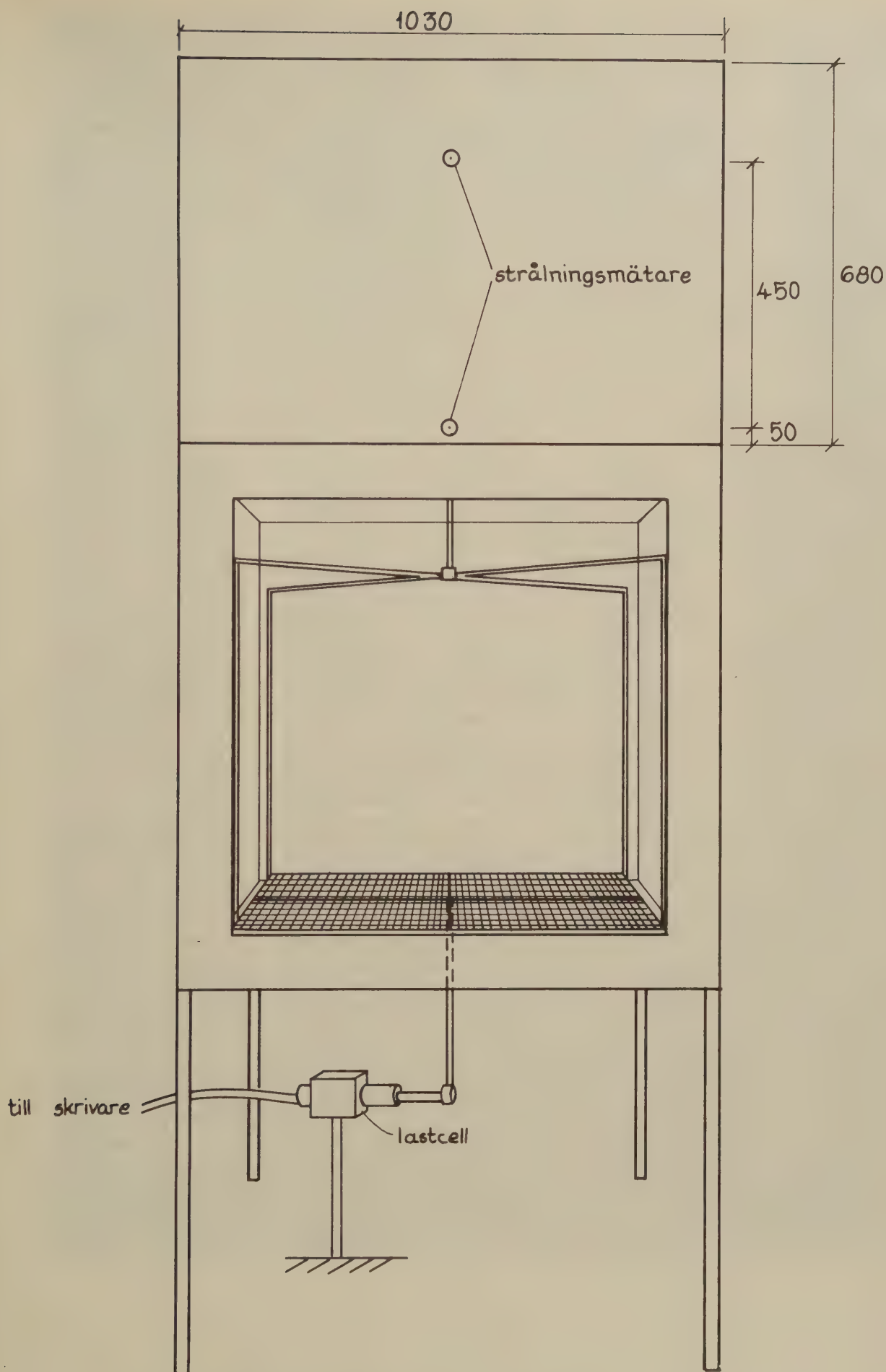


FIG 7 Det vid undersökningen använda största modellbrandrummet, sett framifrån. Det i storlek mellanliggande modellbrandrummet är analogt utformat.

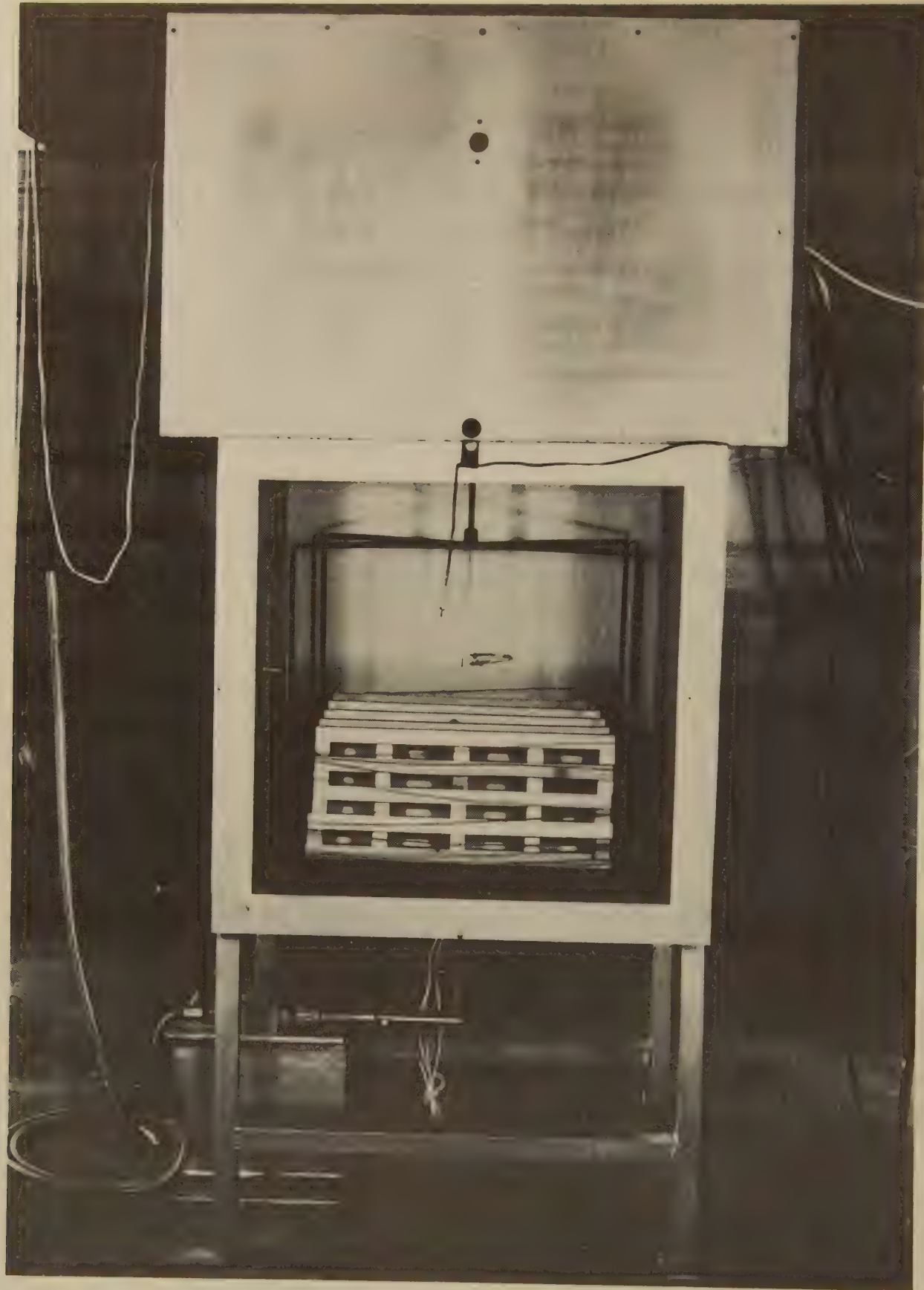


FIG 8 Foto, representativt för de båda större modellbrandrummen.

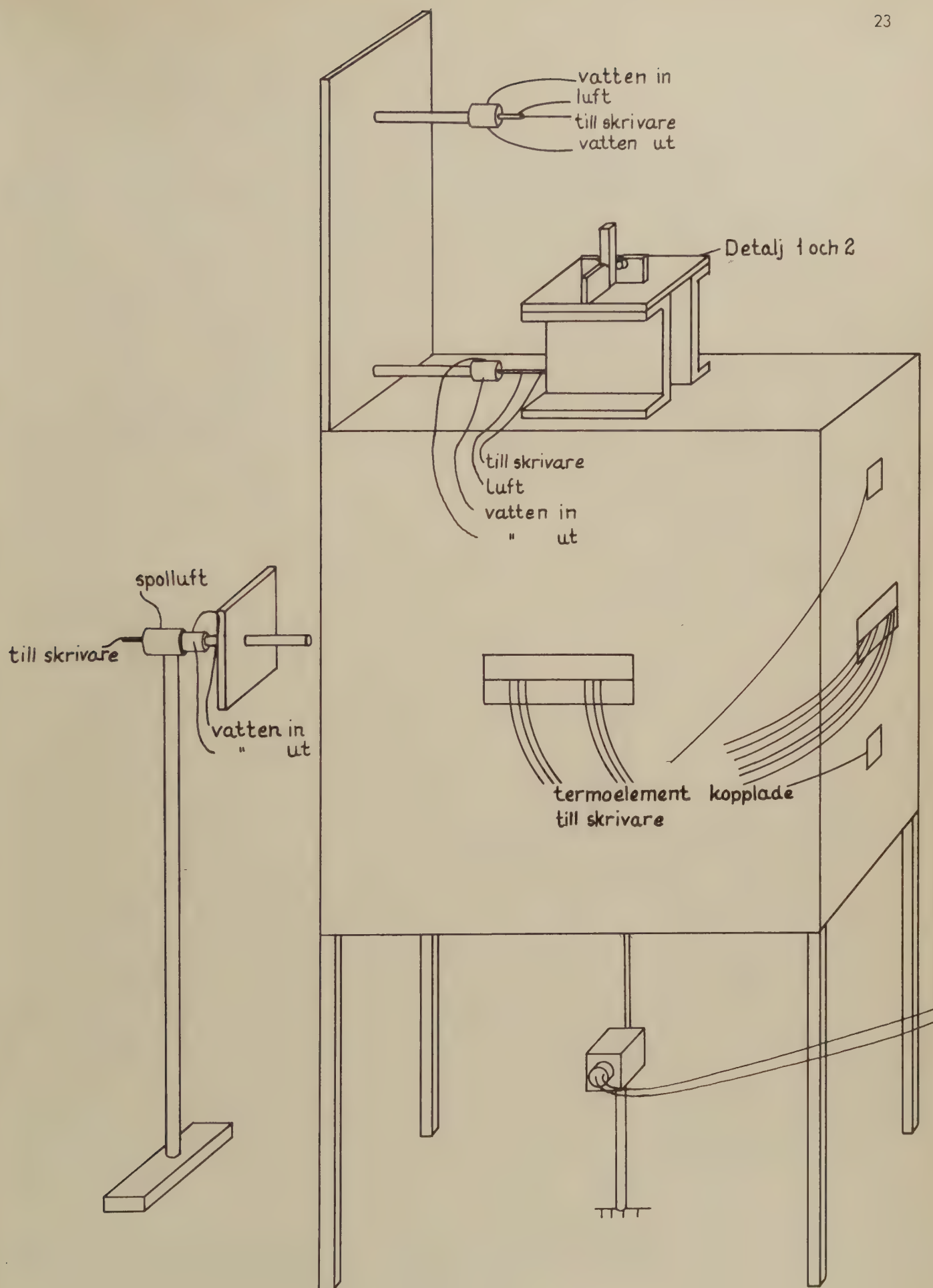
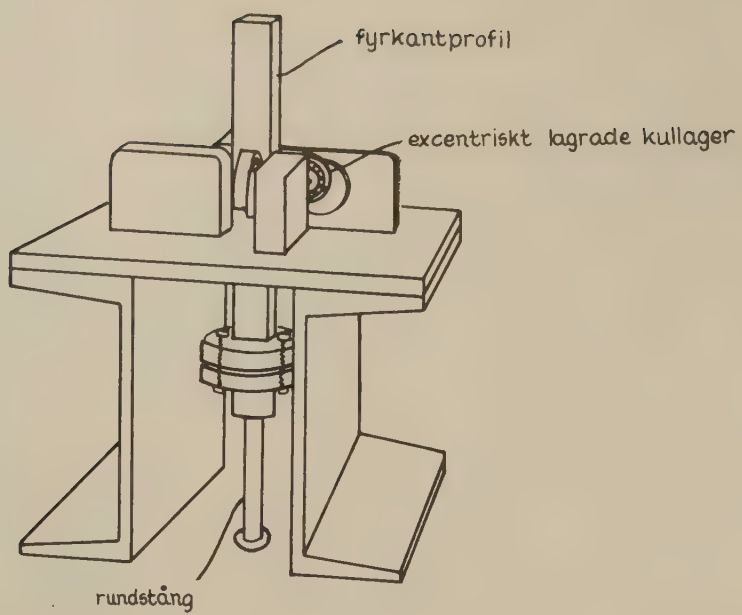
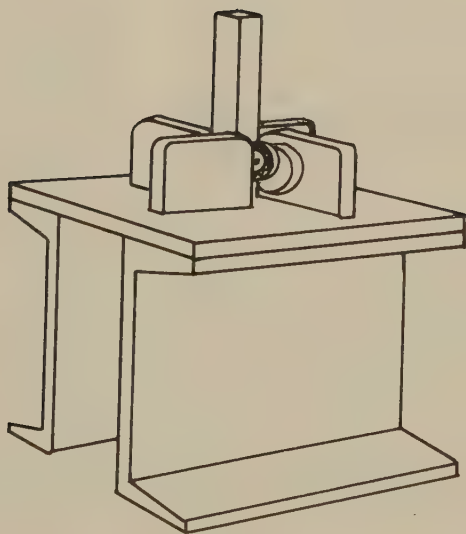


Fig 9 Representativ sidovy av de båda större modellbrandrummen, inklusive del av mätsystemet. Detaljer på sid 24.



Detalj 1



Detalj 2

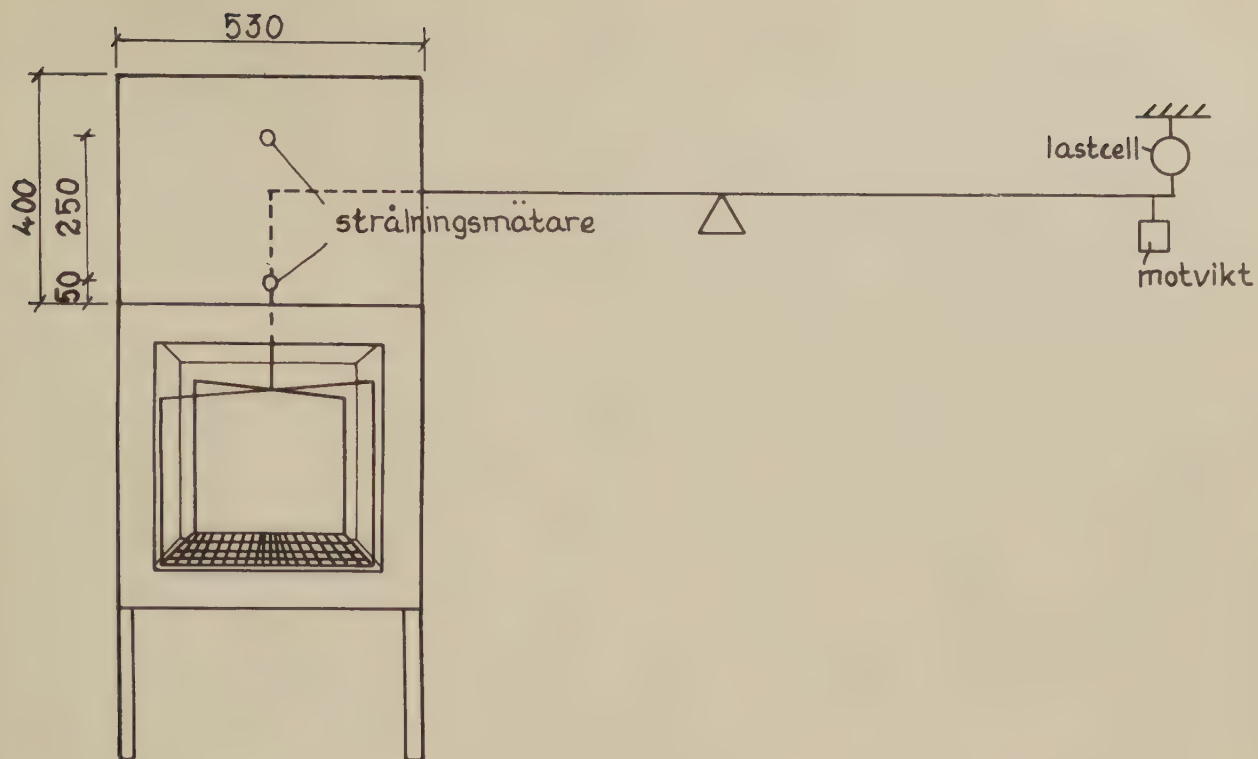


FIG 10 Det vid undersökningen använda minsta modellbrandrummet jämte vågutrustning för brandbelastningen.

TABELL I. Fönsteröppningens dimension hos respektive brandcell
vid varierande öppningsfaktor $\frac{A\sqrt{h}}{A_t} \text{ m}^{1/2}$. Mått i mm.

Brandcell	$\frac{A\sqrt{h}}{A_t} = 0,020$	$\frac{A\sqrt{h}}{A_t} = 0,032$	$\frac{A\sqrt{h}}{A_t} = 0,040$	$\frac{A\sqrt{h}}{A_t} = 0,070$	$\frac{A\sqrt{h}}{A_t} = 0,114$
500x500x500	248	300	327	442	500
750x750x750	340	412	449	562	683
1000x1000x1000	428	518	565	707	859

ledande brandprovning, jfr t.ex /2/. På grundval av ett antal förförsök bedömdes vidare behov av mellanliggande värden föreligga, vilket gav öppningsfaktorerna 0,032 och $0,070 \text{ m}^{1/2}$. Det något speciella värdet $0,032 \text{ m}^{1/2}$ valdes därvid mot bakgrunden av en av författaren genomförd statistisk utvärdering av brandbelastningen i bostadslägenheter /13/.

I tabell I ges en sammanställning över till varje brandcell och öppningsfaktor hörande dimension på fönsteröppningen.

Vid försöken använt bränsle staplades i en korg med något mindre dimension än respektive brandcells sidomått. Härigenom kunde risken elimineras för att under försökens gång korgen eller någon ribba skulle stöta mot någon vägg med en felaktig registrering av förbränningshastigheten som följd. Såväl korgens stomme som rutnätad botten utformades av Kanthaltråd.^(R)

För bestämning av förbränningshastigheten anbringades i de båda större brandrummen i bränslekorgens botten en rundstång - Kanthal, vilken genom ett i brandcellens botten upptaget hål vilade på en lastcell. Nödvändig styrning i sidled av vågsystemet erhöles genom en för ändamålet konstruerad anordning, vilken tillät korgen att fritt röra sig i vertikalled, medan rörelser i sidled var förhindrade. En skiss av styrningsanordningens utformning visas i fig 9b.

Mättekniska svårigheter - bl.a. otillräcklig upplösningsförmåga för den nämnda lastcellen - framtvingade för det minsta brandrummet ett modifierat förfarande för bestämning av förbränningshastigheten. Härvid upphängdes bränslekorgen via en rundstång i ena änden av en hävarm, som i sin andra ände var ansluten till en lastcell, se fig 10. För att eliminera korgens egenvikt och därigenom reducera aktuellt mätområde, kompletterades systemet med en motvikt.

Samtliga försök genomfördes inomhus i en stor laboratoriehall med en fri takhöjd på cirka tio meter, varigenom inverkan från störande och svårkontrollerbara faktorer som vind eller klimatvariationer eliminerades. Vid försöken utvecklade rökgaser ventilerades ut genom en över brandcellerna belägen stor plåthuv, som via en plåtkanal mynnade i det fria.

I fig 11 återges ett översiktsfoto av försöksuppställningen visande brandcell, mätinstrument för registrering av förbränningshastighet och strålningskaraktistika, plåthuv samt delar av plåtkanal.

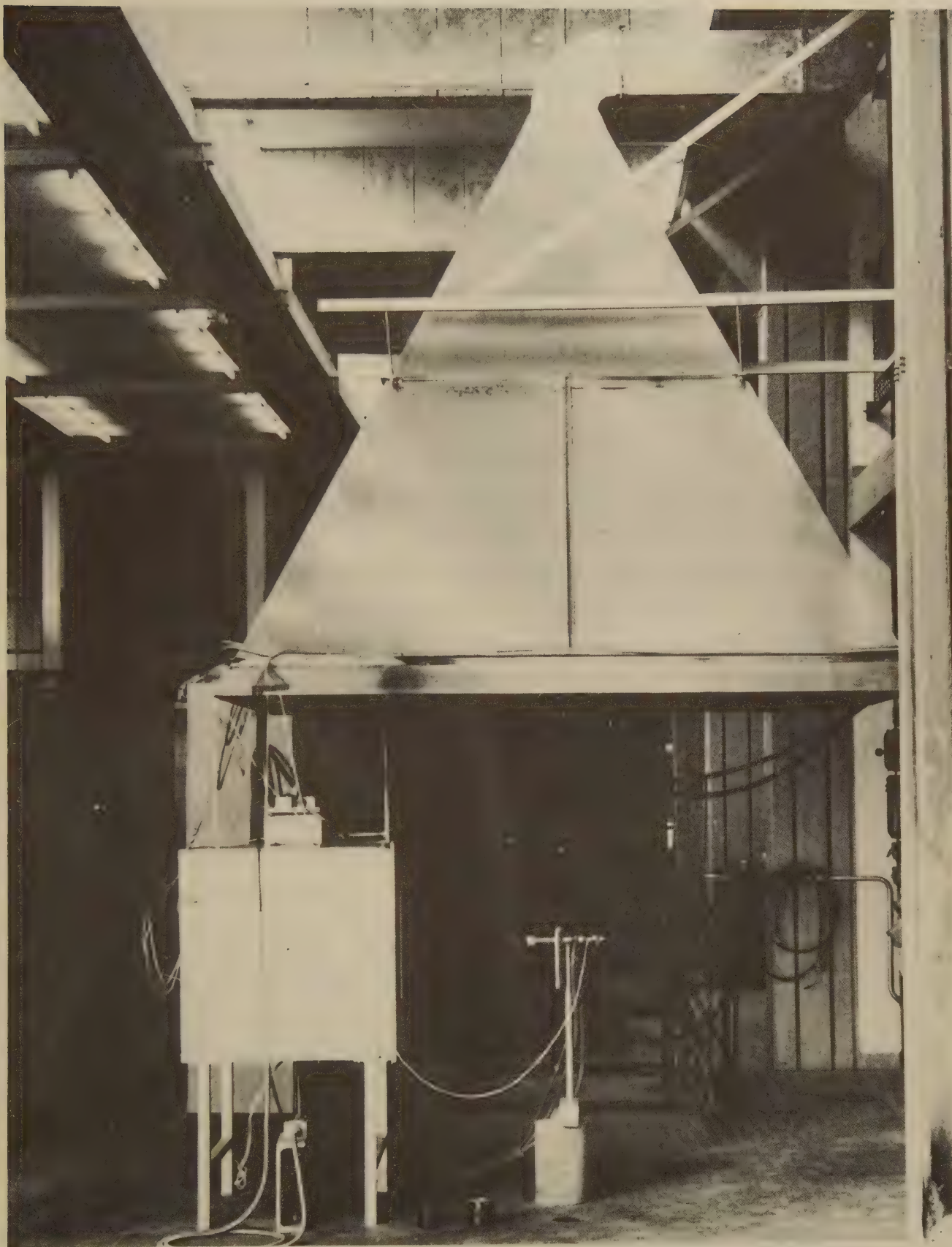


FIG 11 Översiktsfoto av försöksupställning och ventilationshuv.

3. MÄTPROGRAM, MÄTNING, REGISTRERING

3.1 Mätprogrammets omfattning

Mätprogrammet utformades med målet att få en så noggrann karakterisering av brandförloppet som möjligt. Mätprogrammet omfattade i stort en kontinuerlig bestämning för hela brandförloppet - dock med viss koncentration till flamfasens aktiva skede - av förbränningshastigheten, uttryckt som brandbelastningens viktsminskning i kg trä per tidsenhet, gastemperaturen i representativa punkter i brandrummet, brandcellens utvändiga yttemperatur och temperaturen inuti brandcellens omslutande konstruktioner samt för vissa punkter strålningskarakteristika.

3.2 Bestämning av förbränningshastigheten

Vid en teoretisk bestämning över värme- och massabalanssekvationer av i en brandcell erhållen gastemperatur-tidkurva ingår som en väsentlig basstorhet den per tidsenhet utvecklade förbränningsenergin för bränslet under brandförloppet. För träbränsle stöter emellertid en bestämning av denna energimängd på mycket stora svårigheter, vilket primärt beror på träets starkt komplicerade förbränningsmekanism med en samtidig förbränning i de fasta beståndsdelarna och i de vid pyrolysen bildade gaserna på ett sätt vars återverkan på förbränningshastigheten för närvarande ej är klarlagd.

Mot denna bakgrund har i den föreliggande undersökningen valts en bestämning och redovisning av förbränningshastigheten enligt experimentellt utbildad praxis, dvs som bränslets viktsförlust per tidsenhet. På detta sätt bestämda tidkurvor för förbränningshastigheten vid varierande brandförloppsförutsättningar ger i sig själva ett betydelsefullt kunskapsunderlag för bl.a. en mera nyanserad normtillämpning. I ett framtida läge, då träets förbränningsmekanism mera i detalj kartlagts, bör de bestämda tidkurvorna för förbränningshastigheten också kunna utnyttjas för en beräkningsmässig översättning till de tidkurvor för per tidsenhet frigjord värmemängd, som erfordras för en teoretisk analys av brandförloppets karakteristika över brandcellens värme- och massabalanssamband. I kombination med tidkurvor för brandförloppets

gastemperatur bör de bestämda tidkurvorna för förbränningshastigheten i viktsminskning per tidsenhet för bränslet direkt kunna bilda underlag för en approximativ teoretisk beräkning enligt av Magnusson och Thelandersson angivet förfarande /14/ av dessa tillhörande tidkurvor för under brandförloppet per tidsenhet frigjord värmemängd.

Vid försöken bestämdes sålunda förbränningshastigheten genom kontinuerlig vägning av i brandcellen kvarvarande mängd bränsle. Härvid användes i de båda större brandrummen en böjlastgivare typ Philips 6100 P/50 K, medan i den mindre brandcellen en vid institutionen tillverkad trycklastgivare med en nominell belastning av 10 kp användes. Orsaken till att två olika lastceller användes, berodde dels på att använd böjlastgivare ej hade tillräcklig upplösningssförmåga vid små laster, dels på att i den mindre brandcellen korgens egenvikt i förhållande till använd bränslemängd var alltför stor, för att en utbalansering av denna egenvikt skulle vara möjlig.

Respektive lastcell kopplades till en pennskrivare typ Servogor med förskjutbar nollpunkt, varigenom en utbalansering av korgens egenvikt möjliggjordes. Erhållen kurva anger därför direkt vikten av i varje tidsmoment av brandförloppet återstående mängd brännbart material. En typisk viktskurva, hämtad från genomförd försöksserie, visas i fig 12.

Före varje försök kalibrerades vågutrustningen med kända vikter för kontroll av att någon störande friktion ej uppkommit i styrordning eller hävarmssystem. Tareringsförfarandet belyses av fig 12, ur vilken också på ett illustrativt sätt framgår brandförloppets olika huvudfaser (antändnings-, flam- samt glöd- och avsvafningsfas). Under antändningsfasen, som i tidshänseende varierar i längd beroende på aktuell porositets- och öppningsfaktor, sker en successiv ökning av förbränningshastigheten, vilken under den därpå följande flamfasen approximativt är konstant, varvid 50 à 60% av ingående bränslemängd räknat på ursprunglig vikt förbrukas. Därefter övergår brandförloppet på ett markant sätt i glöd- och avsvafningsfasen, varunder stapeln rasar samman till en glödhög och slutgiltigt förbränns.

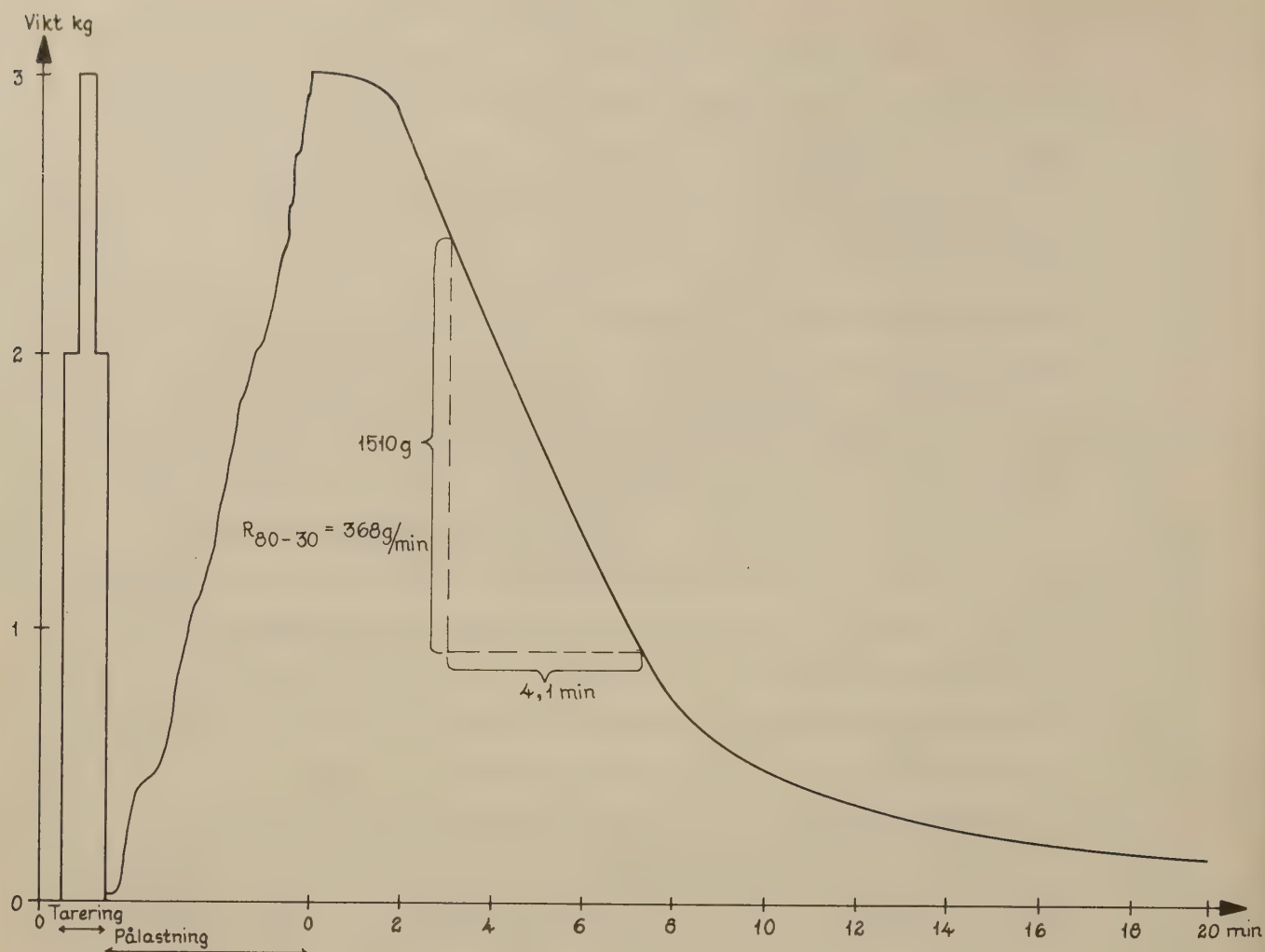


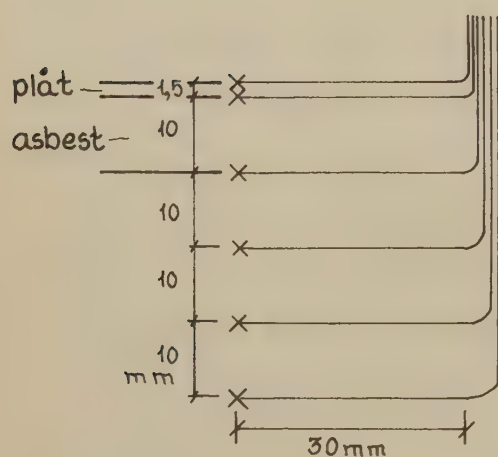
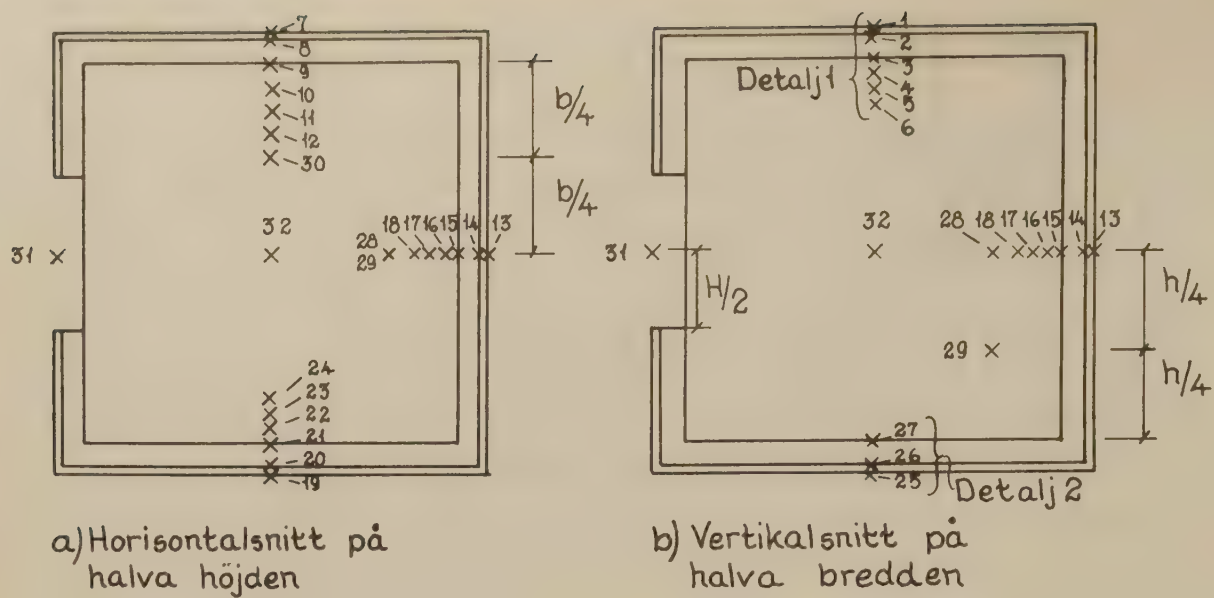
FIG 12 Under ett brandförlopp upptagen representativ viktsminskningskurva. (Brandcell $500 \times 500 \times 500 \text{ mm}^3$; $A\sqrt{h}/A_t = 0.040 \text{ m}^{1/2}$; $q = 3.029 \text{ kg}$; $\phi = 0.360 \text{ cm}^{1,1}$)

3.3 Temperaturregistrering

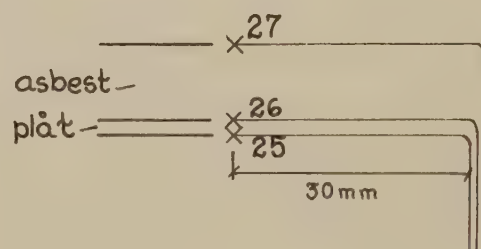
Vid ett brandförlopp i en brandcell erhållen gastemperatur-tidkurva, vilken vid given brandbelastning beror av bl.a. brandcellens öppningsfaktor och omslutande konstruktions termiska egenskaper, är direkt avgörande för t.ex. en brandpåverkad bärande konstruktions verkningssätt och bärförmåga. Därutöver är - som framhållits i avsnitt 3.2 - nyanserade kunskaper om brandförloppets gastemperatur-tidkurva vid varierande förutsättningar fundamentala för en approximativ teoretisk bestämning av till brandbelastningens eller bränslets viktsminskning per tidsenhet hörande frigjord värmemängd per tidsenhet vid varje enskild tidpunkt av brandförloppet.

En kartläggning av vid försöken erhållet gastemperatur-tidförlopp bedömdes mot denna bakgrund väsentligt. En kontinuerlig registrering av gastemperaturen genomfördes därför i representativa punkter i brandcellen. Härvid gjordes en avvägning av mätpunkternas antal och placering för att vid ett rimligt antal mätpunkter få en så allsidig bild som möjligt av temperaturförhållandena i brandrummet. Detta ledde till val av 32 mätpunkter i varje brandcell med temperaturgivare av oskyddade termoelement av typ Chromel-Alumel. En skiss över mätpunkternas placering i respektive brandrum visas i fig 13, ur vilken framgår att i varje centrumsnitt av tak, golv och hela väggsidor var ett termoelement beläget utvändigt, ett mellan plåt och asbestskiva och ett på asbestskivans insida. I samma tak- och väggsnitt registrerades därutöver brandgastemperaturen i för varje snitt tre invändiga mätpunkter, belägna på avståndet 10, 20 respektive 30 mm från brandcellens inneryta. Dessutom placerades för en bestämning av gastemperaturens fördelning inom brandcellen inuti varje brandcell och i centrum av fönsteröppningen ytterligare fem termoelement (nr 28-32). Samtliga termoelement, med undantag av de fem sistnämnda, arrangerades så att anslutningsledningen närmast lödstället följde en isoterm.

Utslagen från termoelementen registrerades dels på en skrivare av fabrikat Honeywell (24 punkter, stämpelintervall 4,5 s) dels på en skrivare av fabrikat Texas, för vilken stämpelintervallet vid kort brandvaraktighet valdes till 2,5 s och vid längre brandvaraktighet till 5 s.



Detalj 1



Detalj 2

Detalj 1 gäller i princip termoelementgrupperna 1-6, 7-12, 13-18, 19-24.

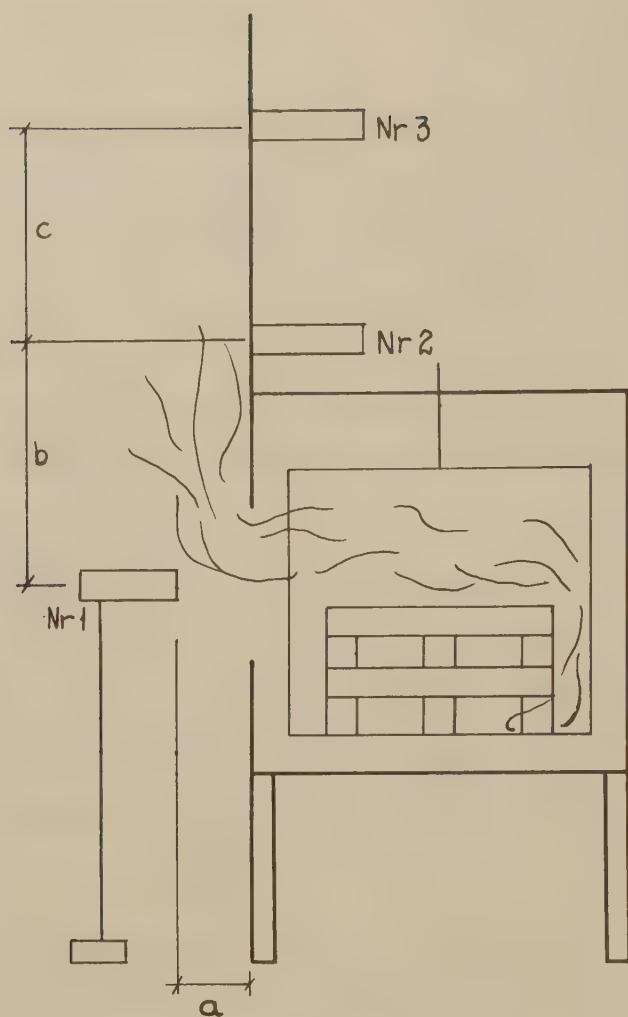
FIG 13 Termoelementens placering och numrering.

3.4 Strålningsmätningar

Som komplement till termoelementmätningarna registrerades även totalstrålningen från brandgaser och flammor mot tre mätpunkter med placering enligt fig 14. Strålningsmätningarna genomfördes med totalstrålningspyrometrar av typ Gunners /15/. Erhållen utspänning uppmättes i mV och registrerades dels på en pennskrivare av fabrikat Servogor, dels på en punktskrivare av fabrikat Texas. Före försöken hade för varje mätare en kalibreringskurva upptagits (fig 15) genom vilken utspänningen kunde översättas till totalstrålningsintensitet.

Av skissen över strålningsmätarnas placering (fig 14) framgår, att en strålningsmätare var placerad i nivå med fönsteröppningens mitt och riktad in mot brandrummets centrala del, medan de båda andra strålningsmätarna var belägna i olika nivåer i en från fönsterväggen uppåt fortsatt fasad, och registrerande mot denna fasad infallande totalstrålning från genom fönsteröppningen utträngande flammor och rökgaser.

En lösryckt illustration till erhållna strålningskurvor ger fig 16. Kurvan är upptagen av den strålningsmätare som är riktad in mot brandrummets centrala del och som genom att vara ansluten till pennskrivaren givit en kontinuerlig kurva, medan de båda andra strålningsmätarna genom koppling till punktskrivaren gav intermittenta kurvor.



Brandcell (mm ³)	a (mm)	b (mm)	c (mm)
500x500x500	150	300	250
750x750x750	500	425	450
1000x1000x1000	750	550	450

FIG 14 Strålningsmätarnas placering.

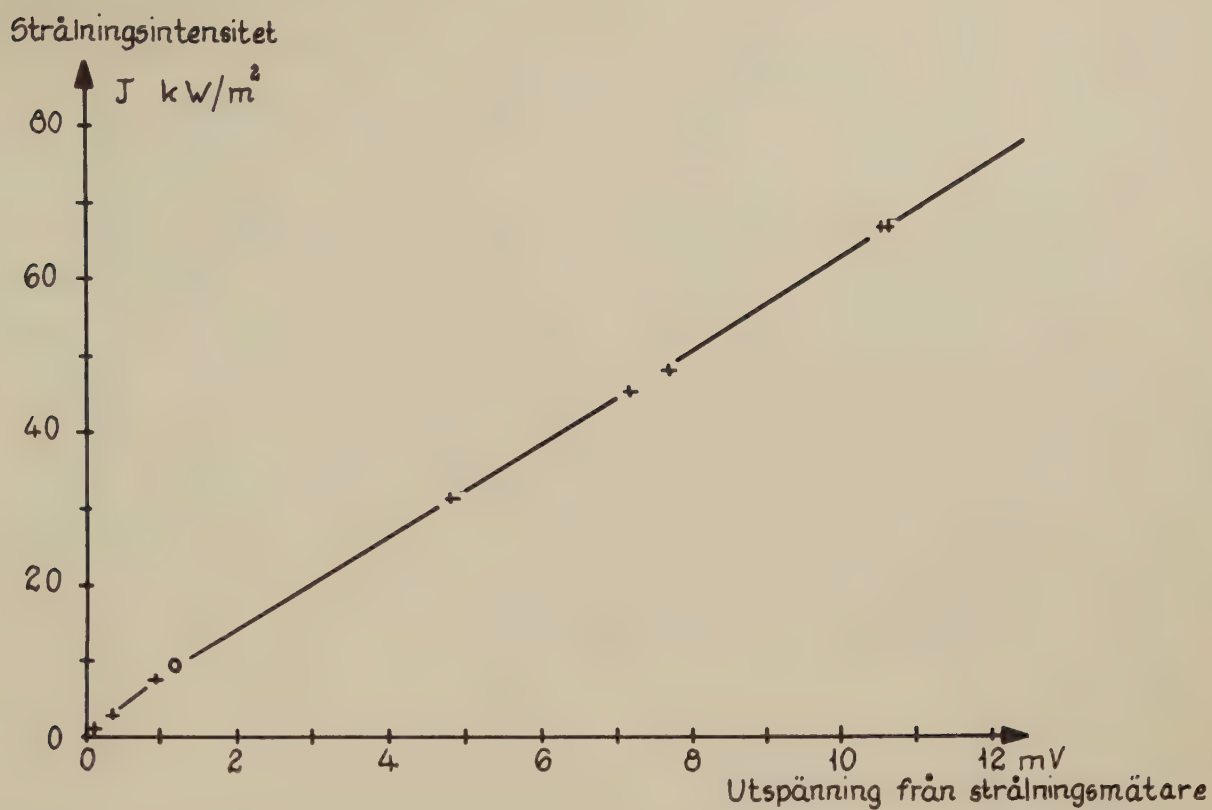


FIG 15 Kalibreringskurva för strålningsmätare 1.

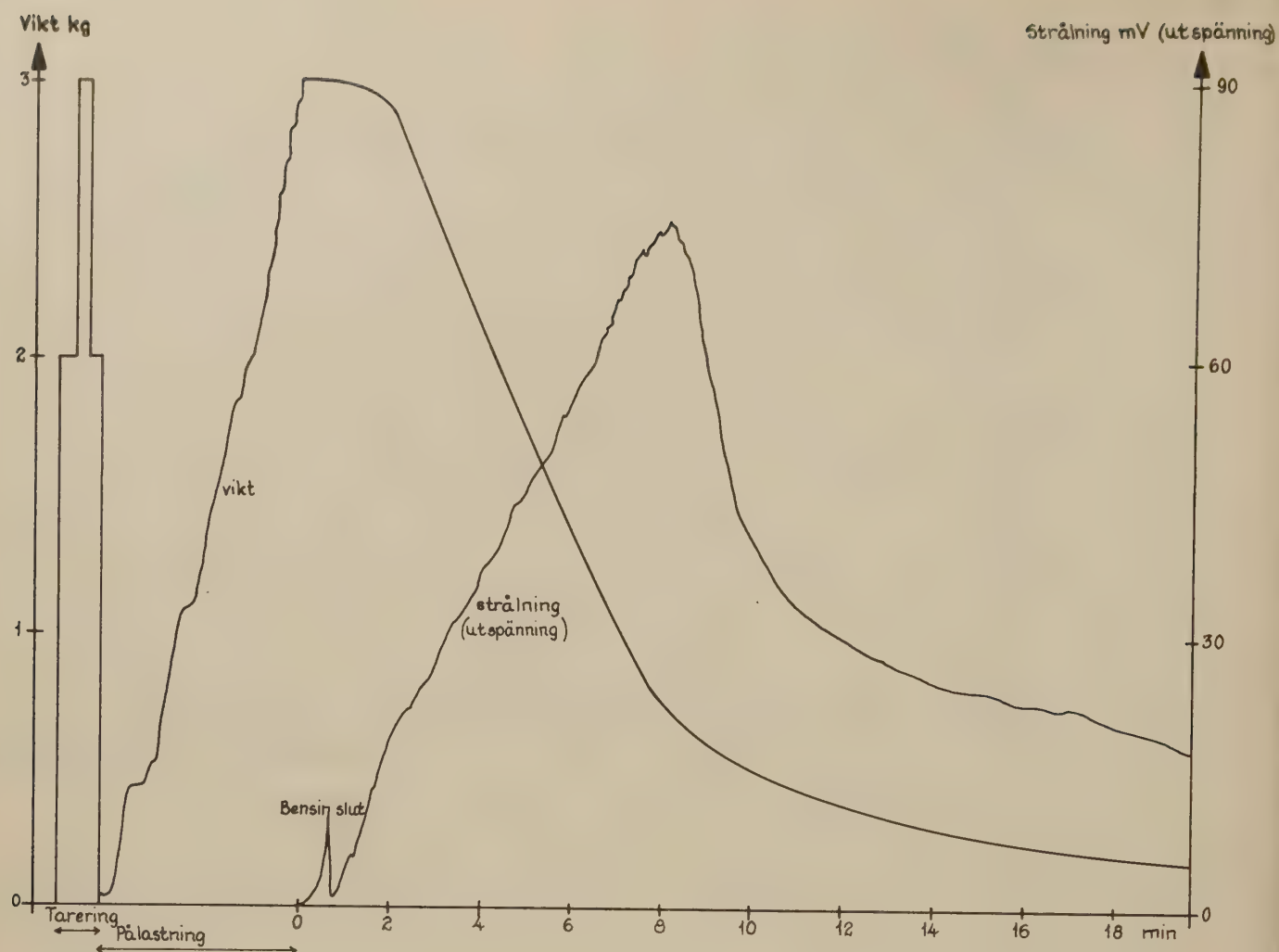


FIG 16 Representativa, experimentellt bestämda strålnings- och viktsminskningskurvor. (Brandcell 500 x 500 x 500 mm³; $A\sqrt{h}/A_t = 0.040 \text{ m}^{1/2}$; $q = 3.029 \text{ kg}$; $\phi = 0.360 \text{ cm}^{1,1}$)

4. FÖRSÖKSKARAKTERISTIKA

4.1 Försökens allmänna uppläggning

För att i ett initialskede begränsa antalet parametrar genomfördes i denna rapport beskriven försöksserie med en för samtliga försök approximativt konstant brandbelastning ($2 \text{ kg trä per m}^2 \text{ omslutningsyta}$). Variabler i försöksserien var modellskalan, varvid som tidigare nämnts tre rumsstorlekar användes (jfr avsnitt 2 och tabell I) öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$, varvid för varje modellbrandrum inverkan på förbränningshastigheten av fem olika öppningsfaktörvärden undersöktes, samt brandbelastningens porositetsfaktor ϕ , definierad enligt ekvation 2. För den sistnämnda variabeln önskades därvid en så god täckning inom intervallet 0 till $1 \text{ cm}^{1,1}$, som praktiskt var möjlig.

I tabell II - IV ges en sammanställning av för varje brandcell undersökta värden på porositetsfaktorn ϕ samt för den tillhörande stapeln antalet lager ribb N , antalet ribbor n i varje lager samt enskild ribbas längd L .

4.2 Brandbelastning

Brandbelastningen utgjordes av ribbor av furu med kvadratisk tvärsnitt ($25 \times 25 \text{ mm}^2$). Med hänsyn till att antalet lager ribb och antalet ribbor i varje lager varierade från försök till försök, var även ribbornas längder variabla men så avpassade, att antalet löpmeter ribb för varje modellbrandrum var konstant, nämligen 9,6, 21,6 respektive 38,4 lpm. Detta motsvarar en brandbelastning av $2,0 \text{ kg trä eller } 2,0 \cdot 4,2 = 8,4 \text{ Mcal per m}^2 \text{ omslutningsyta}$.

Före försöken lagrades bränslet i konditioneringsrum vid en temperatur av 20°C och 43% relativ luftfuktighet, tills fuktjämvikt inträtt. Häremot svarande fuktkvot i virket uppgår till 9,3%, räknat på torr volymvikt.

Vid val av ribbor eftersträvades en sådan blandning av dessa att inte enbart speciellt kådrik furu hamnade i samma försök. Trots en sådan sortering erhöles en relativt kraftig variation från försök till försök av densiteten hos virket, vilket framgår i tabell V - VII, kolumn 3 i avsnitt 5:1.

TABELL II, III och IV För porositetsfaktorn ϕ ($\text{cm}^{1,1}$) tillhörande samband hos trä-
ribbstapeln mellan antalet ribb n i varje lager, antalet lager
ribb N samt enskild ribbas längd L (mm).

TABELL II. Brandrum 500x500x500 mm³

ϕ ($\text{cm}^{1,1}$)	n	N	L (mm)
0,027	7	6	229
0,060	6	7	229
0,083	5	9	213
0,117	6	6	267
0,129	5	8	240
0,197	5	7	274
0,270	4	9	267
0,303	5	6	320
0,360	4	8	300
0,477	3	11	291
0,580	3	10	320
0,716	3	9	356

TABELL III. Brandrum 750x750x750 mm³

ϕ ($\text{cm}^{1,1}$)	n	N	L (mm)
0,028	9	8	300
0,061	9	7	343
0,117	10	5	432
0,208	6	10	360
0,276	7	7	441
0,374	8	5	540
0,495	6	7	514
0,581	4	12	450
0,688	4	11	491
0,826	4	10	540
1,092	3	13	554

TABELL IV. Brandrum 1000x1000x1000 mm³

ϕ ($\text{cm}^{1,1}$)	n	N	L (mm)
0,025	13	7	422
0,062	12	7	457
0,120	11	7	499
0,200	11	6	582
0,278	8	9	533
0,369	8	8	600
0,483	10	5	768
0,581	7	8	686
0,730	6	9	711
0,830	5	11	698
0,913	6	8	800
0,989	5	10	768

TABELL V Resultatsammanställning för i modellbrandrunnet 500 x 500 x 500 mm³ genomförda försök.

BRANDCELL 500 x 500 x 500 mm³

$\frac{A\sqrt{h}}{A_t}$ (m ^{1/2})	ϕ (cm ^{1,1})	Bränsle- vikt (kg)	R _{max} (kg/min)	R ₈₀₋₃₀ (kg/min)	Maxtemperatur °C Temperaturmätpunkter		Median- värde (°C)	Strålning (kW/m ²)	Flam- fasens längd (min)	Försök nr
					12	18				
0,02	0,027	3,135	0,110	0,110	694	750	613	22	15,0	53
"	0,117	3,270	0,261	0,261	798	790	732	30	9,5	47
"	0,197	3,147	0,276	0,276	826	798	643	30	9,0	46
"	0,197	2,820	0,289	0,274	744	742	509	24	6,5	54
"	0,270	3,192	0,111	0,111	876	796	524	31	8,5	51
"	0,270	3,097	0,327	0,327	820	762	632	28	7,0	43
"	0,303	3,000	0,276	0,276	906	774	543	29	9,5	49
"	0,303	3,193	0,270	0,257	816	790	642	30	10,0	44
"	0,360	3,195	0,327	0,326	912	828	563	27	7,5	45
"	0,477	3,373	0,333	0,333	852	828	630	26	8,0	48
"	0,580	3,195	0,290	0,290	828	840	591	28	8,5	50
"	0,716	3,103	0,259	0,227	958	912	548	32	10,5	52
0,032	0,027	3,083	0,139	0,128	582	576	517	27	13,0	20
"	0,060	2,908	0,235	0,220	606	588	457	28	9,0	21
"	0,083	3,218	0,238	0,231	594	588	533	-	10,0	13

TABELL V (forts.)

BRANDCELL 500 x 500 x 500 mm³

$\frac{A\sqrt{h}}{A_t}$ ($\frac{m^1}{m^2}$)	ϕ (cm^1, l)	Bränsle- vikt (kg)	R_{max} (kg/min)	R_{80-30} (kg/min)	Maxtemperatur °C Temperaturmätpunkter		Median- värde	θ_{80-30} (°C)	Strålning (kW/m ²)	Flam- fasens längd (min)	Försök nr
					12	18	24				
0,032	0,129	2,919	0,310	0,310	840	810	880	651	48	8,5	18
"	0,197	3,248	0,346	0,345	933	772	774	554	-	8,0	14
"	0,270	3,390	0,377	0,377	766	732	831	729	43	8,5	17
"	0,303	3,175	0,376	0,369	904	804	912	729	-	8,0	15
"	0,360	3,023	0,382	0,373	666	654	726	743	32	8,0	19
"	0,477	3,079	0,433	0,433	900	850	888	727	40	5,5	38
"	0,580	2,943	0,433	0,376	916	862	888	690	38	5,5	37
"	0,716	3,277	0,443	0,400	964	898	990	638	44	6,5	39
0,04	0,027	3,072	0,120	0,115	480	452	513	434	17	12,0	68
"	0,060	3,288	0,241	0,227	612	592	631	529	26	8,5	67
"	0,083	3,053	0,272	0,256	562	561	625	498	25	8,5	69
"	0,129	3,086	0,350	0,350	650	642	685	532	28	7,0	60
"	0,197	3,129	0,363	0,363	756	486	793	603	38	6,5	61
"	0,270	3,121	0,403	0,346	768	539	784	636	47	5,5	62
"	0,303	3,271	0,402	0,380	900	688	913	714	40	5,5	63

TABELL V (forts.)

BRANDCELL 500 x 500 x 500 mm³

$\frac{A\sqrt{h}}{A_t}$ (m ^{1/2})	ϕ (cm ^{1,1})	Bränsle- vikt (kg)	R _{max} (kg/min)	R ₈₀₋₃₀ (kg/min)	Maxtemperatur Temperaturmätpunkter °C		Median- värde	θ_{80-30} (°C)	Strålning (kW/m ²)	Flam- fasens längd (min)	Försök nr
					12	18	24				
0,04	0,360	3,029	0,423	0,368	760	712	835	659	48	5,5	64
"	0,477	2,851	0,433	0,395	850	818	880	693	47	5,5	66
"	0,477	3,271	0,466	0,466	832	830	908	735	47	5,5	70
"	0,580	3,154	0,525	0,463	872	812	883	800	47	5,5	65
"	0,716	3,139	0,425	0,402	965	928	889	754	55	5,5	71
0,07	0,027	3,975	0,164	0,153	376	376	408	549	17	13,0	31
"	0,083	3,196	0,269	0,257	436	460	496	717	24	8,5	30
"	0,129	3,385	0,362	0,313	546	514	544	782	25	7,5	29
"	0,197	3,795	0,413	0,403	660	654	726	822	41	6,0	28
"	0,270	3,045	0,394	0,375	678	672	714	820	41	5,5	32
"	0,270	3,240	0,407	0,405	654	694	776	792	43	5,5	27
"	0,303	3,047	0,458	0,424	808	766	850	844	51	6,0	23
"	0,360	3,009	0,452	0,429	888	762	828	781	55	5,5	24
"	0,360	3,120	0,452	0,421	760	754	816	893	47	5,5	33
"	0,477	2,950	0,567	0,460	756	720	798	861	43	4,0	35

TABELL V (forts.)

BRANDCELL 500 x 500 x 500 mm³

$\frac{A\sqrt{n}}{A_t}$ (m ^{1/2})	ϕ (cm ^{1,1})	Bränsle- vikt (kg)	R _{max} (kg/min)	R ₈₀₋₃₀ (kg/min)	Maxtemperatur °C Temperaturmätpunkter			Median- värde	θ_{80-30} (°C)	Strålning (kW/m ²)	Flam- fasens längd (min)	Försök nr
					12	18	24					
0,07	0,580	3,245	0,653	0,463	918	792	874	874	857	46	5,0	34
"	0,716	3,190	0,588	0,437	954	838	940	954	927	52	5,0	36
0,114	0,027	3,250	0,160	0,143	277	279	320	279	272	-	9,0	6
"	0,060	3,222	0,240	0,219	362	336	367	362	330	-	9,0	1
"	0,060	3,110	0,248	0,236	384	391	431	391	329	-	9,0	2
"	0,083	2,940	0,253	0,224	-	-	-	-	-	-	8,5	12
"	0,117	3,095	0,339	0,322	467	445	521	467	418	-	6,5	3
"	0,117	3,290	0,334	0,332	466	477	556	477	401	-	6,5	5
"	0,117	3,380	0,332	0,325	502	460	534	502	437	27	8,5	26
"	0,129	2,990	0,336	0,321	-	-	-	-	-	-	6,0	9
"	0,197	2,965	0,374	0,361	555	565	611	565	580	-	6,0	10
"	0,197	3,340	0,385	0,364	554	536	613	554	481	-	6,5	4
"	0,270	3,144	0,420	0,403	604	640	660	640	396	43	5,5	25
"	0,270	3,220	0,396	0,374	-	-	-	-	-	-	6,0	7
"	0,303	3,320	0,411	0,409	-	-	-	-	-	-	6,0	44

TABELL V (forts.)

BRANDCELL 500 x 500 x 500 mm³

$\frac{A\sqrt{h}}{A_t}$ (m ^{1/2})	ϕ (cm ^{1,1})	Bränsle- vikt (kg)	R _{max} (kg/min)	R ₈₀₋₃₀ (kg/min)	Maxtemperatur °C		Median- värde	θ_{80-30} (°C)	Strålning (kW/m ²)	Flam- fasens längd (min)	Försök nr
					Temperaturmätpunkter	12	18	24			
0,114	0,360	2,885	0,428	0,394	-	-	-	-	-	6,0	8
"	0,477	2,965	0,502	0,449	708	676	724	708	41	5,0	41
"	0,580	3,197	0,583	0,432	792	742	780	780	38	5,0	40
"	0,716	2,980	0,572	0,425	886	726	784	784	37	5,0	42

TABELL VI Resultatsammanställning för i modellbrandrunnet 750 x 750 x 750 mm³ genomförda försök.

BRANDCELL 750 x 750 x 750 mm³

$\frac{A\sqrt{h}}{A_t}$ (m ^{1/2})	ϕ (cm ^{1,1})	Bränsle- vikt (kg)	$R_{\max}$ (kg/min)	R_{80-30} (kg/min)	Maxtemperatur °C Temperaturmätpunkter		Median- värde	θ_{80-30} (°C)	Strålning (kW/m ²)	Flam- fasens längd (min)	Försök nr
					12	18					
0,02	0,028	7,161	0,219	0,214	645	643	643	622	12	18,0	55
"	0,061	7,001	0,350	0,328	810	805	805	720	18	15,0	54
"	0,117	7,103	0,444	0,441	932	930	930	836	23	12,0	53
"	0,208	6,895	0,438	0,433	800	845	830	648	17	12,5	52
"	0,276	6,979	0,454	0,418	840	868	860	717	19	12,0	51
"	0,374	7,178	0,539	0,504	903	923	918	809	21	11,0	50
"	0,495	6,769	0,472	0,452	848	882	848	724	19	12,0	49
"	0,581	7,216	0,493	0,472	848	845	845	640	18	12,0	48
"	0,688	6,777	0,478	0,437	855	830	830	663	18	12,0	47
"	0,826	6,931	0,515	0,447	870	890	890	705	19	11,0	46
"	1,092	7,096	0,548	0,448	868	888	868	660	18	11,0	45
0,032	0,028	7,217	0,246	0,224	485	550	535	501	11	17,0	44
"	0,061	7,149	0,490	0,441	650	690	685	639	17	11,0	43
"	0,117	7,107	0,578	0,477	1010	1033	1010	847	28	9,0	42
"	0,208	7,197	0,720	0,712	713	752	750	655	23	7,5	41

TABELL VI (forts.)

BRANDCELL 750 x 750 x 750 mm³

$\frac{A\sqrt{h}}{A_t}$ (m ^{1/2})	ϕ (cm ^{1,1})	Bränsle- vikt (kg)	$R_{\max}$ (kg/min)	R_{80-30} (kg/min)	Maxtemperatur °C Temperaturmätpunkter		Median- värde	θ_{80-30} (°C)	Strålning (kW/m ²)	Flam- fasens längd (min)	Försök nr
					12	18	24				
0,032	0,276	7,088	0,722	0,643	783	812	885	740	26	7,5	40
"	0,374	6,966	0,655	0,628	1018	1032	990	865	32	8,0	39
"	0,495	7,165	0,664	0,618	888	868	840	747	27	8,5	38
"	0,581	7,144	0,885	0,831	865	845	825	719	27	6,5	37
"	0,688	7,143	0,925	0,784	890	922	848	689	28	7,0	36
"	0,826	6,717	0,770	0,673	888	888	870	685	29	7,5	35
"	1,092	7,003	0,795	0,765	898	898	730	749	26	7,0	34
0,04	0,028	7,189	0,323	0,289	504	543	503	448	13	15,0	33
"	0,061	6,948	0,467	0,418	613	624	645	531	18	11,0	32
"	0,117	7,130	0,525	0,452	940	829	918	775	25	10,0	31
"	0,208	7,212	0,819	0,800	695	721	745	635	26	7,0	30
"	0,276	7,258	0,768	0,695	772	800	840	700	27	7,5	29
"	0,374	7,158	0,766	0,679	1018	1018	996	793	32	7,0	28
"	0,495	7,193	0,760	0,725	893	858	845	732	30	6,5	27
"	0,581	7,106	0,942	0,900	862	853	866	759	30	5,5	26

TABELL VI (forts.)

BRANDCELL 750 x 750 x 750 mm³

$\frac{Avh}{A_t}$ (m ^{1/2})	ϕ (cm ^{1,1})	Bränsle- vikt (kg)	$R_{\max}$ (kg/min)	R_{80-30} (kg/min)	Maxtemperatur °C Temperaturmätpunkter			Median- värde	θ_{80-30} (°C)	Strålning (kW/m ²)	Flam- fasens längd (min)	Försök nr
					12	18	24					
0,04	0,688	6,655	0,890	0,860	890	869	840	869	762	30	5,5	25
"	0,826	6,898	0,954	0,853	928	883	893	893	751	30	5,5	24
"	1,092	7,303	0,938	0,853	991	903	900	903	716	29	5,5	23
0,07	0,028	7,083	0,289	0,248	370	400	385	385	346	10	17,0	22
"	0,061	6,979	0,508	0,488	517	515	535	517	452	17	9,0	21
"	0,117	7,184	0,724	0,712	670	645	703	670	591	25	7,0	20
"	0,208	7,192	0,860	0,860	584	613	650	613	581	25	6,5	19
"	0,276	7,486	0,995	0,903	745	740	773	745	659	31	5,5	18
"	0,374	6,910	0,981	0,909	856	852	858	856	703	36	5,5	17
"	0,495	7,781	1,225	1,100	920	877	886	886	753	39	5,0	16
"	0,581	7,240	1,230	1,089	856	826	872	856	691	40	5,0	15
"	0,581	7,246	1,190	1,081	686	708	-	708	806	40	5,0	56
"	0,688	7,171	1,265	1,122	897	914	940	914	752	45	4,5	14
"	0,688	7,491	1,275	1,131	920	922	-	922	803	-	4,5	57
"	0,826	6,654	1,252	1,100	963	933	940	940	797	43	4,5	13

TABELL VI (forts.) BRANDCELL 750 x 750 x 750 mm³

$\frac{A\sqrt{h}}{A_t}$ (m ^{1/2})	ϕ (cm ^{1,1})	Bränsle- vikt (kg)	R_{max} (kg/min)	R_{80-30} (kg/min)	Maxtemperatur Temperaturmätpunkter °C			Median- värde	θ_{80-30} (°C)	Strålning (kW/m ²)	Flam- fasens längd (min)	Försök nr
					12	18	24					
0,07	1,092	6,735	1,125	1,027	978	883	942	942	748	39	5,0	12
0,114	0,028	7,035	0,246	0,243	250	275	273	273	236	9	17,0	11
"	0,061	6,871	0,503	0,485	438	394	438	438	357	16	10,0	8
"	0,117	6,817	0,416	0,674	579	491	619	579	448	22	7,5	9
"	0,208	7,425	0,925	0,836	484	509	558	509	426	24	5,5	10
"	0,276	6,859	0,848	0,782	620	572	645	620	473	28	6,0	5
"	0,374	6,511	0,980	0,860	822	747	820	820	617	36	5,5	6
"	0,495	7,273	1,075	0,988	830	753	795	795	641	38	5,0	7
"	0,581	7,076	1,205	1,048	700	652	-	700	621	36	5,0	4
"	0,688	6,956	1,155	1,015	815	719	740	740	704	37	5,0	3
"	0,826	6,233	1,175	1,005	821	770	805	805	652	36	5,0	2
"	1,092	6,753	1,155	0,933	704	675	860	704	590	27	5,5	1

TABELL VII Resultatsammanställning för i modellbrandrummet 1000 x 1000 x 1000 mm³ genomförda försök.

BRANDCELL 1000 x 1000 x 1000 mm³

$\frac{A\sqrt{h}}{A_t}$ ($m^{1/2}$)	ϕ ($cm^{1,1}$)	Bränsle- vikt (kg)	R_{max} (kg/min)	R_{80-30} (kg/min)	Maxtemperatur °C Temperaturmätpunkter			Median- värde	θ_{80-30} (°C)	Strålning (kW/m^2)	Flam- fasens längd (min)	Försök nr
					12	18	24					
0,02	0,062	12,215	0,685	0,626	900	900	905	900	780	18	13,0	56
"	0,120	12,584	0,863	0,862	955	963	978	955	842	20	13,0	55
"	0,200	12,965	0,800	0,800	965	964	981	965	801	21	12,0	53
"	0,278	12,312	0,835	0,760	965	964	975	965	737	19	13,0	54
"	0,369	12,583	0,870	0,850	941	939	951	941	770	19	11,5	51
"	0,483	13,380	1,010	1,010	968	969	1022	969	815	20	10,0	49
"	0,581	12,993	0,994	0,872	932	935	950	935	773	20	11,0	50
"	0,738	13,088	0,994	0,915	920	917	958	920	767	8	10,0	47
"	0,830	12,937	1,060	0,917	921	931	894	921	666	10	10,0	46
"	0,989	12,956	1,035	0,906	931	930	947	930	730	9	10,0	48
0,032	0,025	12,460	0,408	0,362	515	553	532	532	504	7	19,0	29
"	0,062	13,094	0,725	0,689	830	835	796	830	740	18	13,0	28
"	0,120	12,722	1,130	1,042	910	942	992	942	834	26	7,0	27
"	0,200	12,317	1,278	1,173	1044	1038	1022	1038	865	26	8,0	38
"	0,278	12,974	1,330	1,151	909	908	902	908	803	26	6,5	26
												50

TABELL VII (forts.) BRANDCELL 1000 x 1000 x 1000 mm³

$\frac{A\sqrt{h}}{A_t}$ ($m^{1/2}$)	ϕ ($cm^{1,1}$)	Bränsle- vikt (kg)	R_{max} (kg/min)	R_{80-30} (kg/min)	Maxtemperatur °C Temperaturmätpunkter			Median- värde	θ_{80-30} (°C)	Strålning (kW/m^2)	Flam- fasens längd (min)	Försök nr
					12	18	24					
0,032	0,369	12,623	1,420	1,262	923	910	904	910	841	25	6,0	25
"	0,483	11,866	1,515	1,429	1078	1104	971	1078	874	28	5,5	24
"	0,581	12,290	1,450	1,365	953	954	923	953	798	25	5,5	20
"	0,730	13,218	1,440	1,262	949	950	929	949	798	26	6,0	23
"	0,830	12,828	1,710	1,577	951	979	980	979	794	26	5,5	22
"	0,989	12,808	1,440	1,355	978	1000	982	982	778	26	6,0	21
0,04	0,025	12,408	0,423	0,378	470	475	528	475	423	8	13,0	13
"	0,062	12,888	0,770	0,704	700	750	742	742	645	15	10,0	14
"	0,120	12,948	1,064	1,035	932	920	920	920	702	24	8,0	15
"	0,200	12,295	1,240	1,030	795	940	958	940	826	24	7,5	16
"	0,278	12,710	1,380	1,086	-	834	831	834	822	22	7,0	17
"	0,369	12,205	1,480	1,336	-	-	-	-	-	25	6,0	18
"	0,483	12,889	1,890	1,773	-	1105	1105	1105	926	32	5,5	19
"	0,581	12,173	1,680	1,472	989	987	1020	987	863	18	5,5	45
"	0,730	12,774	1,785	1,596	950	949	952	950	844	28	5,5	43

51

TABELL VII (forts.)

BRANDCELL 1000 x 1000 x 1000 mm³

$\frac{A\sqrt{h}}{A_t}$ (m ^{1/2})	ϕ (cm ^{1,1})	Bränsle- vikt (kg)	$R_{\max}$ (kg/min)	R_{80-30} (kg/min)	Maxtemperatur °C Temperaturmätpunkter			Median- värde (°C)	Strålning (kW/m ²)	Flam- fasens längd (min)	Försök nr
					12	18	24				
0,04	0,830	12,951	1,940	1,667	950	949	991	950	30	5,0	44
"	0,989	12,490	1,625	1,548	982	1019	978	982	28	5,5	42
0,07	0,025	12,299	0,436	0,391	420	449	447	447	8	16,0	40
"	0,062	12,786	0,965	0,722	650	648	619	648	16	10,0	41
"	0,120	12,483	1,370	1,200	782	787	860	787	22	7,0	37
"	0,200	12,464	1,220	1,171	878	849	805	849	27	7,0	36
"	0,200	13,589	1,535	1,471	972	970	934	970	30	5,5	52
"	0,278	12,800	1,770	1,648	797	800	915	800	27	5,5	39
"	0,369	12,770	1,950	1,807	829	830	-	830	31	5,0	35
"	0,483	12,250	1,995	1,875	978	947	-	874	35	5,0	34
"	0,581	12,601	2,230	1,938	922	902	-	904	32	5,0	33
"	0,730	12,432	2,390	1,846	1025	940	886	940	35	4,5	32
"	0,830	12,523	2,680	2,290	971	982	935	971	39	4,5	30
"	0,989	12,456	2,400	1,946	1032	966	934	966	35	4,5	31
0,114	0,027	12,741	0,436	0,392	310	327	320	320	13	17,0	7

BRANDCELL 1000 x 1000 x 1000 mm³

TABELL VII (forts.)

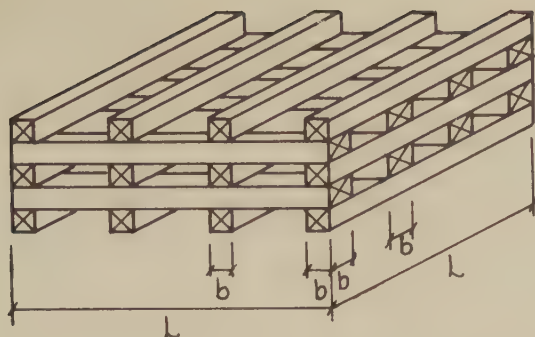
$\frac{A\sqrt{h}}{A_t}$ ($\frac{1}{m^{1/2}}$)	ϕ ($cm^{1,1}$)	Bränsle- vikt (kg)	R_{max} (kg/min)	R_{80-30} (kg/min)	Maxtemperatur °C Temperaturmätpunkter		Median- värde	θ_{80-30} (°C)	Strålning (kW/m ²)	Flam- fasens längd (min)	Försök nr
					12	18	24				
0,114	0,062	12,573	0,936	0,898	490	437	578	395	16	9,0	6
"	0,120	12,077	1,228	1,207	570	512	450	414	19	6,5	5
"	0,200	12,905	1,440	1,290	670	553	558	522	25	6,5	3
"	0,278	12,216	1,700	1,388	580	535	600	460	19	7,0	1
"	0,278	12,407	1,620	1,470	573	587	740	500	23	6,5	2
"	0,369	12,308	1,760	1,619	706	690	720	647	29	5,5	12
"	0,483	12,719	1,930	1,514	928	800	815	593	29	6,0	4
"	0,581	13,019	2,195	1,833	832	812	800	679	37	5,5	8
"	0,730	12,758	2,390	1,993	925	872	876	678	38	5,0	9
"	0,830	12,446	2,520	2,074	932	940	970	824	43	5,0	11
"	0,989	12,564	2,510	2,094	1040	905	925	830	42	5,0	10

Efter vägning staplades ribborna i aktuell brandcells korg, varvid en regelbunden och homogen lagringstäthet enligt fig 17 eftersträvades. Praktiskt var emellertid en absolut strikt lagringstäthet svår att erhålla. Effekt av erhållna avvikelser härifrån kunde dock bedömas praktiskt försumbar för framkomna resultat.

4.3 Antändning

Vid samtliga försök initierades brandförloppet genom antändning av bensin i en liten skål, placerad centralt under vedstapelkorgen.

Antändningsbensinens inverkan på brandförloppet bedömdes som försumbar, då bensinen genomgående var slutbrunnen innan någon väsentlig förbränning av vedstapeln ägt rum. Detta illustreras på ett tydligt sätt av fig 16, av vilken klart framgår, att bensinen fullständigt förbrunnit innan brandförloppets flamfas inträtt.



N lager

n ribbor/lager

L längden av enskild ribba

b ribbornas tvärmått

FIG 17 Träribbstapel med tillhörande definitioner.

5. REDOVISNING AV FÖRSÖKSRESULTAT. DISKUSSION

5.1 Försöksresultat. Allmänt

En sammanställning av vissa vid försöken erhållna, i den fortsatta behandlingen utnyttjade primärvärden ges i tab V - VII. I tabellerna upptas för varje försök

brandcellens öppningsfaktor $A\sqrt{h}/A_t$ ($m^{1/2}$),

brandbelastningens porositetsfaktor ϕ ($cm^{1,1}$),

brandbelastningens initialvikt (kg),

brandförloppets maximala förbränningshastighet R_{max} (kg/min),

medelvärde av förbränningshastigheten under flamfasens aktiva del R_{80-30} (kg/min),

under brandförloppet erhållen maximitemperatur ($^{\circ}C$) i de tre mät-punkterna 12, 18 och 24,

medianvärdet av dessa tre maximitemperaturvärden, vilket bedömts vara representativt för brandcellens maximala gastemperatur,

medelvärde av gastemperaturen under flamfasens aktiva del θ_{80-30} ($^{\circ}C$),

under brandförloppet erhållen maximal strålningsintensitet I (kW/m^2) för den centriskt mot brandcellsöppningen riktade strålningsmätaren samt

flamfasens längd (min).

Som framgår av tabellerna har vissa försök dubblerats eller, för något försök, tripplerats, dels för att få en uppfattning om erhållna värdens reproducerbarhet och dels beroende på i vissa fall något oväntade resultat. Flertalet dubbelförsök har därvid utförts i den minsta brandcellen. En sammanställning av vid dessa försök erhållen medelförbränningshastighet R_{80-30} ges i tab VIII, baserad på i tab V redovisade värden.

Av tab VIII framgår, att vid dubbel- och trippelförsök funnen avvikelse uppgår till 0,7 - 16,5%, räknad på respektive försöksgrupps medelvärde. Avvikelsens medianvärde utgör 5,0%. De förhållandevis små avvikelserna verifierar i sammanhanget tillfredsställande reproducerbarhet och försumbar influens från de sekundära faktorer, som vid given öppnings- och porositetsfaktor kan påverka förbränningshastigheten. Sådana sekundära faktorer utgör

a) Varierande bränslevikt. Vid beräkning av antalet löpmeter ribb per försök har antagits en konstant densitet hos virket. Då denna

TABELL VIII Sammanställning av medelförbränningshastigheten R_{80-30} (kg/min) och skillnad i % räknat på medelvärdet för i brandcell 500 x 500 x 500 mm³ genomförda dubbel- och trippelförsök.

Försök nr	R_{80-30} (kg/min)	Skillnad (kg/min)	Medelvärde (kg/min)	Skillnad i % räknat på medelvärdet
1	219	17	228	7,4
2	236			
3	322	10	326	3,1
5	332			
26	325			
4	364	3	363	0,8
10	361			
7	374	29	389	7,4
25	403			
27	405	30	390	7,7
32	375			
24	429	8	425	1,9
33	421			
66	395	71	431	16,5
70	466			
46	276	2	275	0,7
54	274			
43	327	16	319	5,0
51	311			
44	257	19	267	7,1
49	276			

varierat något, har endast i undantagsfall teoretiskt förutsatt och vid försöken uppmätt vikt av brandbelastningen sammanfallit.

b) Variationer i brandbelastningens stapling. Vid en teoretisk beräkning av ϕ förutsätts att träribbstapeln har ett regelbundet utseende (fig 17). Praktiskt är emellertid avvikelser härifrån ofrånkomliga, vilket påverkar träribbstapelns skorstensyta A_v .

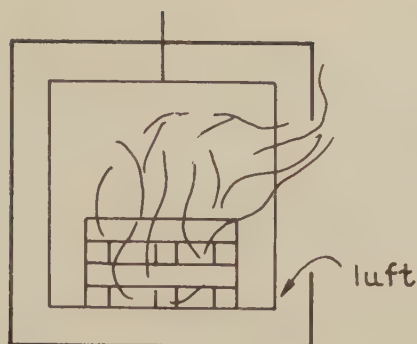
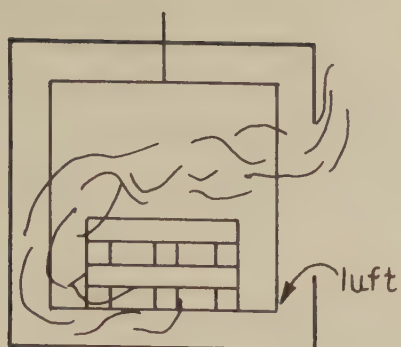
c) Variationer i brandbelastningens placering på brandcellens bränslekorg. Härigenom influeras strömningsförhållanden i och kring brandbelastningen, vilket i sin tur återverkar på brandförloppets karakteristika. I det allmänna fallet antändes vid små värden på porositetsfaktorn ϕ först stapelns undersida och baksida, därefter de båda längssidorna och sist fram- och översida. Vid större värden på porositetsfaktorn antändes i stället stapeln ordinärt inifrån. Undantag fanns emellertid i de båda huvudfallen, beroende på t.ex. variationer i stapelgeometri, stapelplacering och virkesegenskaper (kådinnehåll etc). En illustration av de båda typerna av antändningsförlopp ges i fig 18.

d) Direkta mät- och utvärderingsfel. I de olika brandcellernas system för utvägning av bränslet under brandförloppet kan ha uppträtt en mindre friktion, som är svår att detaljuppskatta. Genom att utvägningsanordningen tarerades före varje försök med kända vikter, kunde dock denna friktionseffekt genomgående påvisas vara liten.

En noggrann mätning av lutningen på viktsminskningskurvorna kunde ibland innebära vissa svårigheter. Detta gäller speciellt i de fall maximal förbränningshastighet uppnåtts endast under ett mycket kort tidsintervall av storleksordningen någon minut.

5.2 Förbränningshastighet

För att belysa hur förbränningshastigheten, här uttryckt som brandbelastningens viktsförlust per tidsenhet, under ett brandförlopp varierar i tiden, kan exempelvis den i fig 12 återgivna viktsminskningskurvan studeras. Som tidigare nämnts beskriver denna kurva hur brandcellens bränslevikt kontinuerligt avtager allt eftersom branden fortskrider. Lutningen mellan kurvans tangent och horisontalplanet anger i varje ögonblick brandbelastningens viktsminskning, och genom att bestämma denna lutning erhålles en viss uppfattning om hur under studerat brandförlopp energin successivt utvecklas.



Stapelns antändning vid:

a) $\phi < 0,3 \text{ cm}^{1,1}$

b) $\phi > 0,3 \text{ cm}^{1,1}$

FIG 18 Stapelns huvudsakliga antändningsförlopp vid olika porositetsfaktorer

Indelas sålunda brandvaraktigheten vid det försök som ligger till grund för förbränningshastighets-tidkurvan i fig 12, exempelvis i tidsperioder om en minut, och approximeras tangentlutningen under respektive tidsperiod med medellutningen, erhålles den i fig 19 heldragna kurvan.

För att möjliggöra en jämförelse mellan denna kurva, vilken beskriver förbränningshastighetens variation i tiden, och de i denna rapport redovisade karakteristika för förbränningshastigheten, nämligen $R_{\max}$ och R_{80-30} , har figuren kompletterats med dessa storheter. $R_{\max}$ definieras härvid som maximal förbränningshastighet bestämd för en tidsperiod av minst en minut, medan R_{80-30} anger medelvärde per tidsenhet av viktsförlusten från 80 till 30% räknat på ursprunglig vikt. Som framgår av figuren återspeglar vid detta försök R_{80-30} medelförbränningshastigheten under flamfasen mycket väl, medan $R_{\max}$ uppnås endast under mycket kort tidsperiod, cirka en minut.

I fig 25-30 återges de ovan angivna vid försöken erhållna karakteristika på förbränningshastigheten, varvid $R_{\max}$ redovisas i fig 25-27, medan R_{80-30} , vilken är den i litteraturen ordinärt givna medelförbränningshastigheten, har sammanställts i fig 28-30.¹⁾

Genomgående ges framkomna resultat med förbränningshastigheten som funktion av brandcellens öppningsfaktor $A\sqrt{h}/A_t$ och bränslets porositetsfaktor ϕ .

Av de redovisade sambanden framgår, att förbränningshastigheten påtagligt varierar med såväl öppningsfaktor $A\sqrt{h}/A_t$ som porositetsfaktor ϕ . Vid konstant ϕ -värde växer förbränningshastigheten till en början med ökad öppningsfaktor för att uppnå ett maximum vid det ungefärliga öppningsfaktorvärdet $A\sqrt{h}/A_t = 0.07 \text{ m}^{1/2}$. Med en ytterligare ökning av öppningsfaktorn utöver detta värde följer en successiv nedgång i förbränningshastigheten. Funna resultat ger därvid i stort samma förbränningshastighetsvärden för de båda öppningsfaktorerna $A\sqrt{h}/A_t = 0.040$ och $0.114 \text{ m}^{1/2}$. Jfr vidare i detta avseende fig 20, vilken är approximativt representativ för nära samtliga försöksresultat.

Funktionellt kan det beskrivna förhållandet förklaras på följande sätt. För små öppningsfaktorer är tillgången i brandcellen på luft,

1) Resultatredovisningen fig. 25 - 43, se sid. 89 och följande.

$$R_{\max} = 0,423 \text{ kg/min}$$

$$R_{80-30} = 0,368 \text{ kg/min}$$

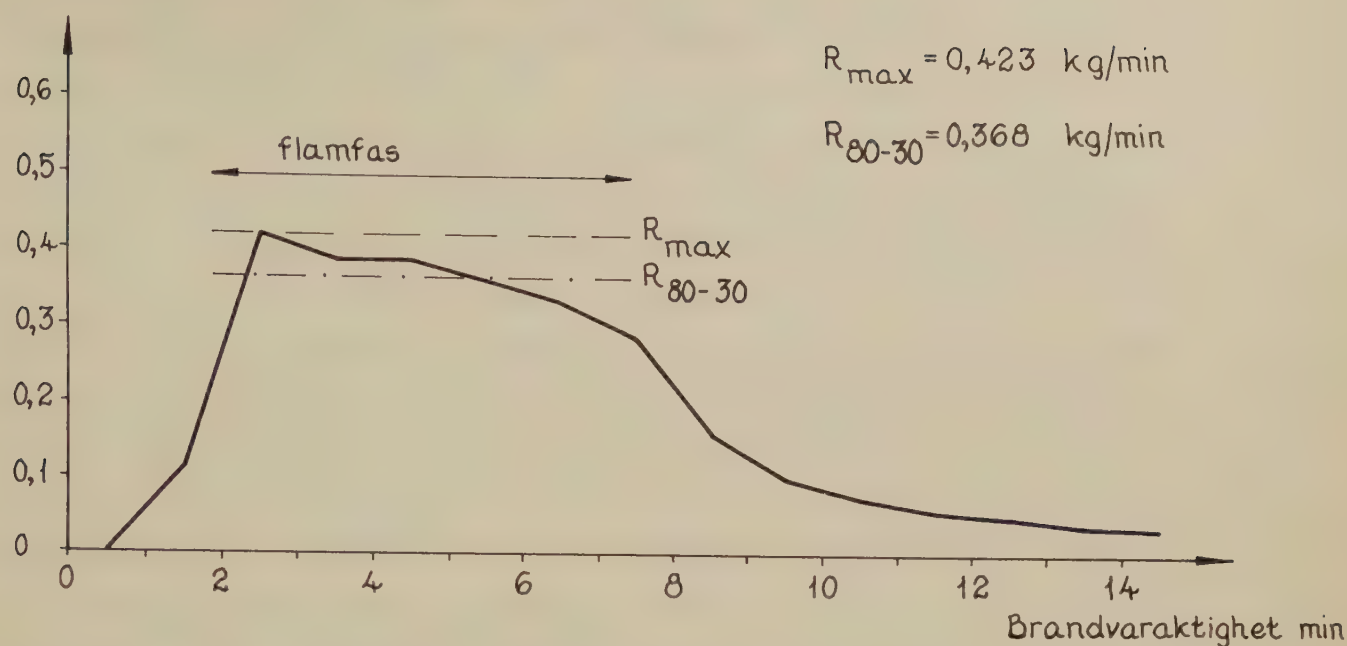


FIG 19 Förbränningshastighetens variation med tiden under ett brandförlopp. (Brandcell 500 x 500 x 500 mm³; $A\sqrt{h}/A_t = 0.040 \text{ m}^{1/2}$; $q = 3.029 \text{ kg}$; $\phi = 0.360 \text{ cm}^{1,1}$)

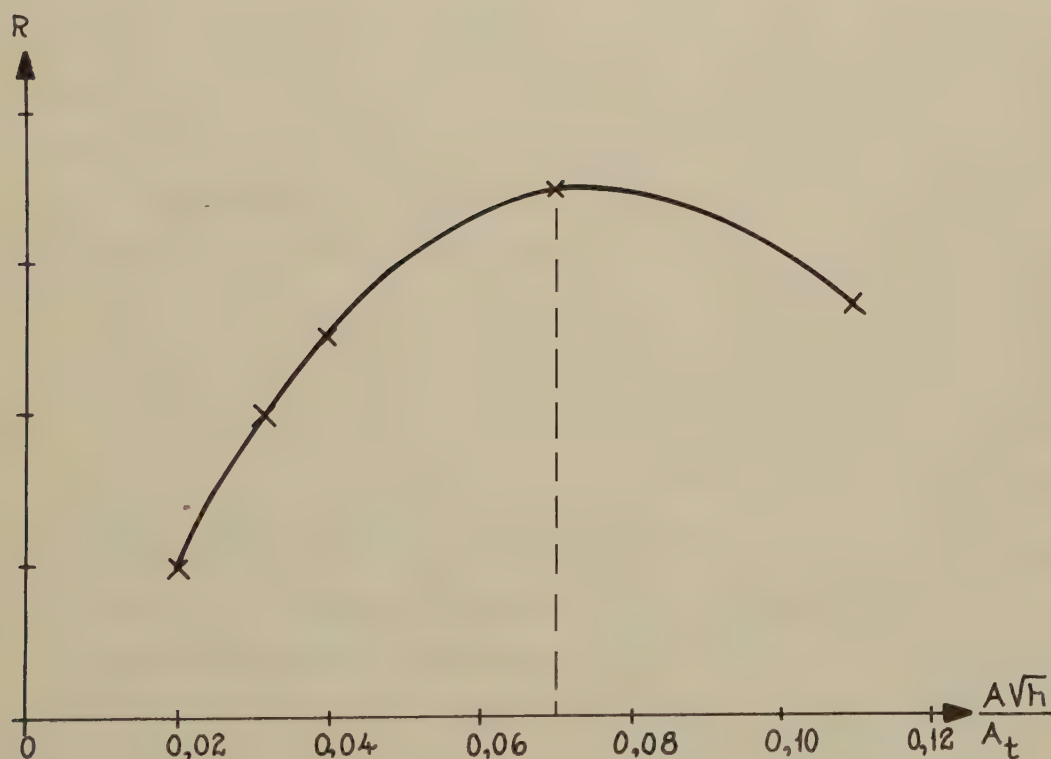


FIG 20 Principiellt förlopp av förbränningshastighetens variation med öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$) då porositetetsfaktorn ϕ är konstant.

vilken växer med ökande fönsteröppning A eller luftflödesfaktor $A\sqrt{h}$, bestämmande för förbränningshastigheten. Detta kan anses gälla för öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t \leq 0.07 \text{ m}^{1/2}$. För större öppningsfaktorer erhålles en så kraftig luftväxling i brandcellen, att temperaturen ej längre uppnår den för optimal pyrolys erforderliga nivån, varför förbränningshastigheten minskar. Fenomenet berörs närmare i avsnitt 5:3 i anslutning till en analys av temperaturkurvorna.

Med hänsyn till inverkan av bränslets porositetsfaktor ϕ följer av de redovisade resultaten, att förbränningshastigheten vid konstant öppningsfaktor $A\sqrt{h}/A_t$ växer med ökad porositetsfaktor ϕ inom området $\phi < 0.5 \text{ cm}^{1,1}$. Därefter bibehålls förbränningshastigheten approximativt konstant inom ϕ -intervallet $0.5 - 0.7$ à $0.8 \text{ cm}^{1,1}$, varpå vid en ytterligare ökning av porositetsfaktorvärdet en märkbar minskning av förbränningshastigheten kan konstateras. Detta gäller speciellt för de i stora brandrummet erhållna värdena av R_{max} och R_{80-30} . Nedgången i förbränningshastigheten förklaras av att avståndet mellan ribborna för $\phi > 0.7$ à 0.8 börjar bli så stort att under förbränningen strålnings- och temperaturpåverkan från en ribba till de närliggande har passerat den optimala.

Vid ett närmare studium av de redovisade kurvorna kan vidare konstateras, att de med få undantag uppvisar en svacka vid porositetsfaktorvärden omkring $\phi = 0.3 \text{ cm}^{1,1}$. En motsvarande svag med observerbar svacka kan även noteras för temperaturkurvorna omedelbart före eller samtidigt med den som uppträder för förbränningskurvorna, jfr avsnitt 5:3. Den återkommande regelbundenheten för kurvorna i detta detaljavseende är intressant. Någon förklaring av fenomenet har dock tyvärr ej gått att finna. Ej heller kunde under själva brandförloppen observeras något som kan förklara företeelsen.

Vid jämförelse mellan R_{max} och R_{80-30} , återgivna i fig 25-30 och tab. V - VII, kolumnerna 4 och 5, framgår, att försöksresultaten ger ett förhållande R_{max}/R_{80-30} som varierar mellan 1.00 och 1.41, således maximalt en differens dem emellan av 41%. Detta innebär, att då R_{80-30} anger medelförbränningshastigheten under en längre tidsperiod (approximativt flamfasens längd), maximala förbränningshastigheten R_{max} för vissa försök erhållits endast under en mycket kort tidsperiod (cirka en minut) med ett vid jämförelse med R_{80-30}

väsentligt högre värde som följd, medan den vid andra försök helt sammanfallit med R_{80-30} , dvs utvecklad flamfas karakteriseras av en jämn förbränning.

Som tidigare nämnts har vissa svårigheter förelegat vid utvärdering av $R_{\max}$, erhållen under en mycket kort tidsperiod. Denna osäkerhet i utvärderingen kombinerat med den relaterade kraftiga spridningen av $R_{\max}$ i förhållande till R_{80-30} har medfört, att i den fortsatta behandlingen av vid försöken erhållen förbränningshastighet, denna helt koncentrerats till medelförbränningshastigheten R_{80-30} . Att maximala förbränningshastigheten $R_{\max}$ trots detta redovisas, motiveras av att den i vissa fall behandlas i litteraturen, varför kompletterande jämförelseresultat kan vara av intresse.

Av de i fig 28-30 sammanställda resultaten framgår, att den i litteraturen ofta refererade formeln $R_{80-30} = 5.5 \text{ à } 6 \sqrt{h}$, vilken med R i kg per minut, A i m^2 och h i m anger förbränningshastigheten R som enbart beroende av luftflödesfaktorn, är alltför onyanserad för att ett brandförlopp skall kunna förutbestämmas på ett mera noggrant sätt. Detta förhållande har tidigare berörts i den i anslutning till fig 5 genomförda summariska diskussionen.

Formeln bör i stället kompletteras dels genom att brandbelastningens porositetsfaktor införes som parameter, dels genom att beakta att förbränningshastigheten vid högre öppningsfaktorvärden än approximativt $0.07 \text{ m}^{1/2}$ ej ökar med denna utan är konstant eller avtagande. En aktuell fråga i sammanhanget är även, om vid konstant porositetsfaktor den i ekvation (5) för förbränningshastigheten angivna tillväxten med luftflödesfaktorn överensstämmer med erhållna försöksresultat vid en öppningsfaktor $\sqrt{h}/A_t < 0.07 \text{ m}^{1/2}$.

För att kunna formulera ett samband mellan förbränningshastigheten R , porositetsfaktorn ϕ och luftflödesfaktorn $\sqrt{h}$ har följande förutsättningar och approximationer gjorts.

Mellan förbränningshastighet och porositetsfaktor har i fig 28-30 för varje öppningsfaktor anpassats räta linjer med största möjliga överensstämmelse med erhållna försöksresultat. Vid kurvpassningen har härvid genomgående förutsatts att förbränningshastigheten är noll vid porositetsfaktorn noll, varefter vid ökande porositetsfaktor en kraftig tillväxt av förbränningshastigheten gällande till

ϕ -värdet $0.1 \text{ cm}^{1,1}$ äger rum. Vid detta ϕ -värde erhåller linjerna en brytpunkt, då i intervallet $0.1 < \phi < 0.5$ förbränningshastigheten i jämförelse med tidigare intervall har en långsammare tillväxt. Vid en ytterligare ökning av porositetsfaktorn, dvs för $\phi > 0.5 \text{ cm}^{1,1}$ har förbränningshastigheten antagits konstant och oberoende av förefintligt porositetsfaktorvärde.

Då förbränningshastigheten R är konstant eller i vissa fall avtagande för öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t > 0.07 \text{ m}^{1/2}$, antages i den fortsatta behandlingen det värde som ges på förbränningshastigheten för $A\sqrt{h}/A_t = 0.07 \text{ m}^{1/2}$ som representativt för samtliga öppningsfaktorvärden $\geq 0.07 \text{ m}^{1/2}$.

Återgivna linjer kan för varje öppningsfaktor med tillfredsställande approximation anses beskriva relationen förbränningshastighet - luftflödesfaktor, samtidigt som de genom sina enkla uttryckssätt ger möjlighet till en vidare bearbetning med syfte att finna ett samband mellan samtliga tre storheter, öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$, alternativt luftflödesfaktorn $A\sqrt{h}$, porositetsfaktorn ϕ och förbränningshastigheten R .

Om i fig 28-30 förbränningshastighetens storlek bestäms ur angivna räta linjer för porositetsfaktorn $\phi = 0.1$ respektive 0.5 , dvs i linjernas båda brytpunkter, erhålles de i tab IX återgivna värdena. I tabellen har dessutom angetts den luftflödesfaktor $A\sqrt{h}$ som för varje brandcell svarar mot studerad öppningsfaktor $A\sqrt{h}/A_t$. I tab IX angivna samband mellan luftflödesfaktorn $A\sqrt{h}$, porositetsfaktorn ϕ och förbränningshastigheten R har grafiskt åskådliggjorts i fig 21.

De inlagda punkterna indikerar, att för given porositetsfaktor ϕ , i figuren 0.1 respektive $0.5 \text{ cm}^{1,1}$, de värden som erhållits på förbränningshastigheten vid de luftflödesfaktorvärden som för varje brandcell svarar mot öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t = 0.020$ respektive $0.032 \text{ m}^{1/2}$, approximativt ligger på en rät linje. För de båda i figuren behandlade porositetsfaktorvärdena kan nämnda linjer, inlagda i samma figur, beskrivas av ekvationerna

$$R = 4.16 A\sqrt{h} + 0.136 \text{ kg/min} \quad (\phi = 0.1 \text{ cm}^{1,1}) \quad (6)$$

respektive

$$R = 6.67 A\sqrt{h} + 0.069 \text{ kg/min} \quad (\phi = 0.5 \text{ cm}^{1,1}) \quad (7)$$

TABELL IX Medelförbränningshastighetens R_{80-30} (kg/min) storlek, bestämd av i FIG 28-30 inlagda linjer för porositetsfaktorn $\phi = 0.1$ respektive $0.5 \text{ cm}^{1,1}$.

$A\sqrt{h}$ ($\text{m}^{5/2}$)	Brandcell	$\frac{A\sqrt{h}}{A_t}$ ($\text{m}^{1/2}$)	R_{80-30} (kg/min)	
			$\phi = 0,1$	$\phi = 0,5 \text{ cm}^{1,1}$
0,031	500x500x500	0,020	0,290	0,290
0,049	500x500x500	0,032	0,320	0,400
0,061	500x500x500	0,040	0,330	0,415
0,068	750x750x750	0,020	0,400	0,450
0,107	500x500x500	0,070	0,350	0,460
0,109	750x750x750	0,032	0,530	0,775
0,120	1000x1000x1000	0,020	0,700	0,900
0,135	750x750x750	0,040	0,585	0,850
0,193	1000x1000x1000	0,032	0,950	1,400
0,237	750x750x750	0,070	0,690	1,100
0,240	1000x1000x1000	0,040	0,970	1,600
0,420	1000x1000x1000	0,070	1,200	1,900

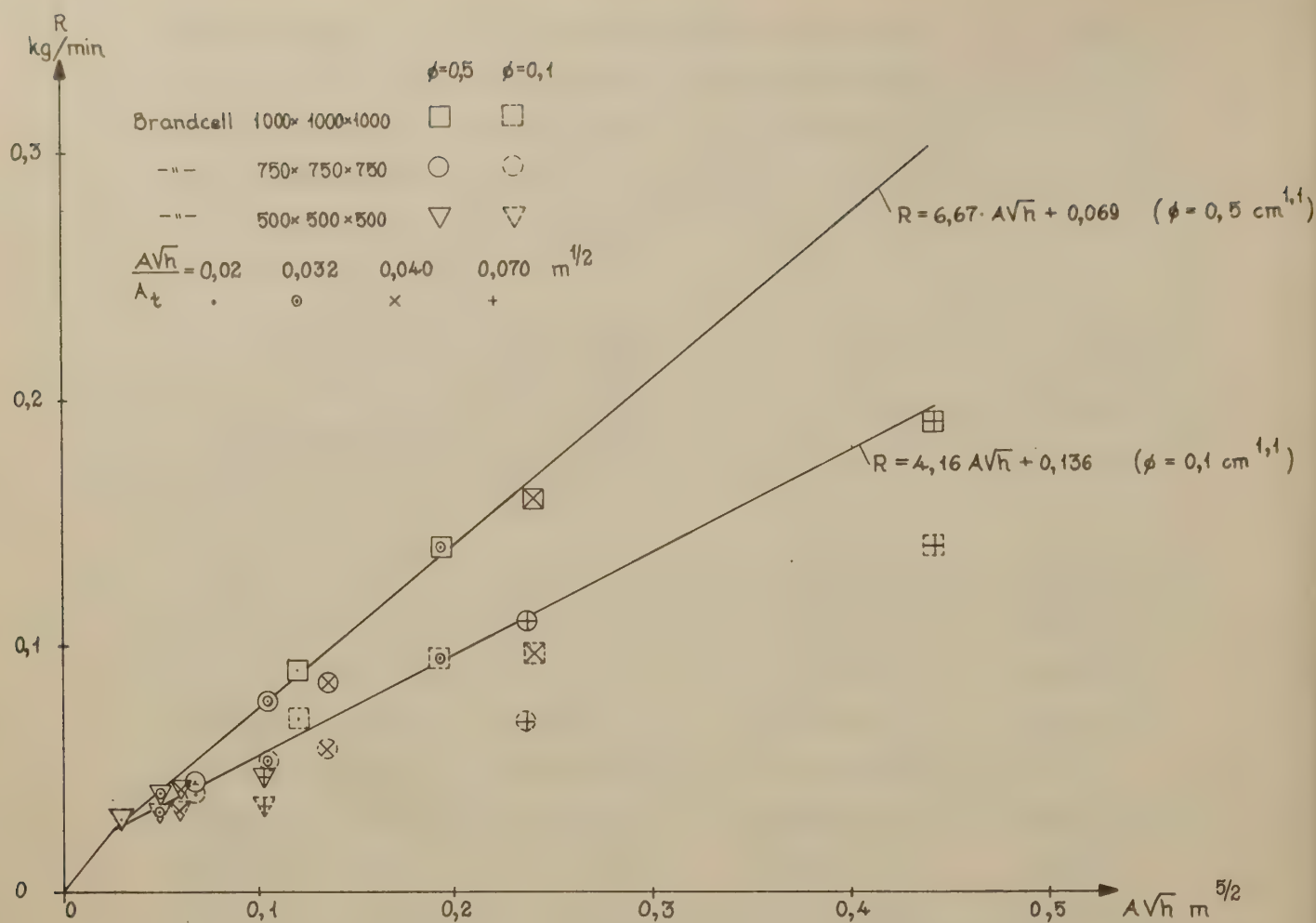


FIG 21 Grafisk representation av i FIG 28-30 erhållna värden på förbränningshastigheten R_{80-30} (kg/min) för $\phi = 0.1$ resp. 0.5 ($\text{cm}^{1,1}$) och $AVh/A_t = 0.020, 0.032, 0.040$ och 0.070 ($\text{m}^{1/2}$). I FIG 28-30 anger dessa värden inlagda linjers brytpunkter. Approximativt ligger erhållna värden på förbränningshastigheten R för $AVh/A_t = 0.020$ och $0.032 \text{ m}^{1/2}$ på räta linjen $R = 4.16 AVh + 0.136$ kg/min för $\phi = 0.1 \text{ cm}^{1,1}$ och på räta linjen $R = 6.67 AVh + 0.069$ kg/min för $\phi = 0.5 \text{ cm}^{1,1}$.

För mellanliggande porositetsfaktörvärden, dvs $0.1 < \phi < 0.5$, beskrivs förbränningshastighetens variation med luftflödesfaktorn av räta linjer, som samtliga går mot punkten ($A\sqrt{h} = 0.0267 \text{ m}^{5/2}$; $R = 0.247 \text{ kg/min}$) och är belägna inom den yta som begränsas av de enligt ekv (6) och (7) beskrivna linjerna.

Vid en analys av härvid erhållen figur 21 kan noteras det intressanta faktum, att öppningsfaktorerna $A\sqrt{h}/A_t = 0.040$ respektive $0.070 \text{ m}^{1/2}$, vid given luftflödesfaktor kvoten mellan det på räta linjen uppmätta och vid försöken experimentellt bestämda värdet på förbränningshastigheten approximativt är konstant. Detta gäller såväl vid porositetsfaktorn $\phi = 0.1$ som $0.5 \text{ cm}^{1,1}$. För illustration härav har för respektive luftflödesfaktor angivna värden på förbränningshastigheten samt tillhörande kvot sammanställts i tab X.

Det faktum, att för ett värde på öppningsfaktorn $> 0.032 \text{ m}^{1/2}$, vid given luftflödesfaktor kvoten mellan ur figuren uppmätt och experimentellt erhållet värde på förbränningshastigheten approximativt är konstant, indikerar att denna karakteriseras av en dämpad tillväxt som kan beaktas genom att ekvationerna (6) och (7) kompletteras med en multiplikator $1/k$, där k varierar enligt fig 22.

Sammanfattas ekv (6) och (7), vilka beskriver förbränningshastighetens beroende av luftflödesfaktorn vid en konstant porositetsfaktor ϕ som är 0.1 respektive 0.5, till en allmängiltig ekvation, som innefattar dels hela intervallet av undersökta porositetsfaktörvärden och dels beaktar konstanten k 's inverkan, erhålles följande generella formel för en bestämning av förbränningshastigheten

$$R = \frac{1}{k} [(6.25 \phi + 3.53) A\sqrt{h} - 0.165 \phi + 0.153] \quad (8)$$

vilken för ϕ i $\text{cm}^{1,1}$ och $A\sqrt{h}$ i $\text{m}^{5/2}$ ger R i kg per minut .

Multiplikatorn k bestäms ur fig 22, dvs

för $A\sqrt{h}/A_t \leq 0.03 \text{ m}^{1/2}$, sätt $k = 1$

för $0.03 < A\sqrt{h}/A_t \leq 0.07$, bestäm k ur ekvationen

$$k = 15 \frac{A\sqrt{h}}{A_t} + 0.55 \quad (9)$$

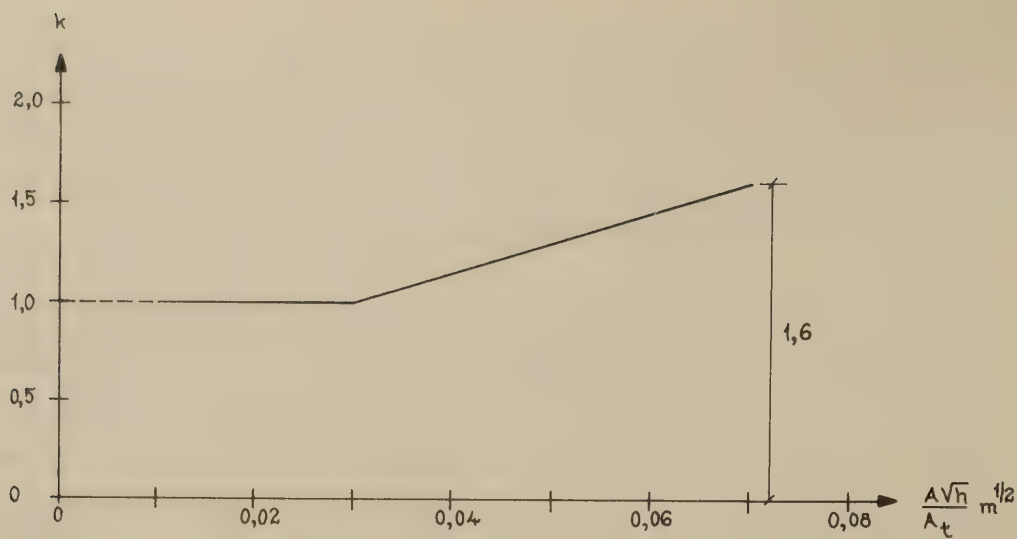


FIG 22 Faktorn k :s variation med öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$).

Till ekvation (8) hör följande bivillkor:

Om luftflödesfaktorn $A\sqrt{h} < 0.0267 \text{ m}^{5/2}$, bestäm förbränningshastigheten ur ekvationen

$$R = 9.25 A\sqrt{h} \quad (10)$$

Om porositetsfaktorn $\phi < 0.1 \text{ cm}^{1,1}$, bestäm förbränningshastigheten genom rätlinjig interpolation mellan punkterna ($\phi = 0$, $R = 0$) och ($\phi = 0.1$, R bestämd ur ekv 8).

Om porositetsfaktorn $\phi > 0.5 \text{ cm}^{1,1}$, sätt $\phi = 0.5$.

Om öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t > 0.07 \text{ m}^{1/2}$, ges förbränningshastigheten R av det mot $A\sqrt{h}/A_t = 0.07 \text{ m}^{1/2}$ svarande värdet på luftflödesfaktorn $A\sqrt{h}$.

Till ekv (8) - (10) med tillhörande bivillkor må följande kommentarer göras.

I ekv (8) ingår storheten ϕ med dimension $\text{cm}^{1,1}$. Önskvärt vore en modifierad dimensionslös form, vilken skulle ge en enklare koppling till reella förhållanden den dag en tillfredsställande bedömning av porositeten hos konventionell brandbelastning är möjlig. (Med konventionell brandbelastning menas här den i vanligare typer av byggnader och lokaler förekommande.) Emellertid måste viss anknytning till i annat sammanhang genomförda undersökningar ske, dels för att ge möjlighet till jämförelser och dels därför att undersökningarna kompletterar varandra och täpper till luckor i vårt vetande. Detta har medfört att den av Gross /5/ i ekv (2) givna definitionen på porositetsfaktorn använts, samtidigt som försök företagits med syfte att ur de av Gross redovisade i fig 3 återgivna resultaten söka överföra ϕ till en modifierad dimensionslös form med bibehållande av angiven kurvas principiella utseende. Dessa ansatser har emellertid ej varit framgångsrika, varför i ekv (2) angiven definition av porositetsfaktorn ϕ bibehållits.

Vid studium av fig 3 vilken återger av Gross experimentellt upptaget samband mellan förbränningshastigheten R , dock i modifierad form, och porositeten för en träribbstapel vid brand i det fria, kan rekapituleras det tidigare i avsnitt 1.3 berörda faktum, att i intervallet $0 < \phi < 0.1$ respektive $0.1 < \phi < 0.4$ den skalmodifierade förbränningshastigheten har en linjär tillväxt med respektive är oberoende av porositetsfaktorn, men att för porositetsfak-

torvärden $\phi > 0.4 \text{ cm}^{1,1}$ en icke fortgående förbränning erhållits. Motsvarande samband erhållna vid i denna rapport beskriven försöksserie, och återgivna i fig 28-30, visar, att vid brand i sluten brandcell med en fönsteröppning, förbränningshastigheten R har en linjär tillväxt med porositetsfaktorn ϕ upp till $\phi = 0.5 \text{ cm}^{1,1}$, varvid dock tillväxthastigheten normalt är väsentligt högre i intervallet $0 < \phi < 0.1$ jämfört med intervallet $0.1 < \phi < 0.5$. Detta innebär att vid brand i det fria, det värde på porositetsfaktorn som markerar övergången till det stadium som kännetecknas av en icke fortgående förbränning, i fallet sluten brandcell med en fönsteröppning fortfarande ger en med porositetsfaktorn linjärt växande förbränningshastighet vilken först vid värdet $\phi > 0.5$ blir konstant och oberoende av träribbstapelns porositet. Erhållna skiljaktigheter i de båda brandförloppen, dvs brand i det fria respektive brand i sluten brandcell med en fönsteröppning, kan förklaras av att i det förra fallet strålningsvärme och heta brandgaser bortgår utan egentlig återverkan på brandförloppets skeende, vilket bl.a. innebär, att temperaturen genomgående blir låg. I det senare fallet förhindras dessa i stor utsträckning att avgå för att i stället samverka till att temperaturen uppnår den för optimal pyrolysis erforderliga nivån.

Det bör för övrigt påpekas, att av Gross registrerad "icke fortgående förbränning", erhållen för $\phi > 0.4$ icke i något fall kunde konstateras under försöken, inte ens i brandcell $750 \times 750 \times 750 \text{ mm}^3$ vid en porositetsfaktor $\phi = 1.092 \text{ cm}^{1,1}$. Av fig 28-30 erhålles dock viss indikering på att detta fenomen kan uppkomma då i vissa fall en minskning av förbränningshastigheten kan noteras vid en öppningsfaktor $A\sqrt{h}/A_t > 0.07 \text{ m}^{1/2}$.

I ekv. (8) ingår multiplikatorn $1/k$, vilken korregerar det genom ekvationen givna linjära sambandet mellan förbränningshastighet, porositets- och luftflödesfaktor till överensstämmelse med vid försöken erhållna resultat för samtliga öppningsfaktorvärden $\leq 0.07 \text{ m}^{1/2}$.

Vid bestämning av denna multiplikators utseende gäller, att i intervallet $0.02 < A\sqrt{h}/A_t < 0.032 \text{ m}^{1/2}$ försöksresultaten för porositetsfaktorvärdena $\phi = 0.1$ respektive $0.5 \text{ cm}^{1,1}$ gett en variation av förbränningshastigheten som kan beskrivas genom de i ekv (6)

och (7) givna sambanden. Då ekv (8) för $k = 1$ i sig inrymmer dessa båda ekvationer ger detta som konsekvens att i aktuellt intervall k tilldelas värdet 1, jfr fig 22.

I avsaknad av försöksresultat förutsättes att analoga förhållanden gäller i intervallet $0 < \sqrt{h}/A_t < 0.02$, vilket i figuren inlagts streckmarkerat.

Ur tab X framgår att förbränningshastigheten karakteriseras av en dämpad tillväxt som för öppningsfaktorerna $\sqrt{h}/A_t = 0.04$ respektive $0.07 \text{ m}^{1/2}$ beskrivs genom att ekvationerna (6) - (8) kompletteras med multiplikatorn $1/k$, där respektive k -värde är 1.14 och 1.59. I avsaknad av mellanliggande försöksresultat kan endast konstateras, att mellan dessa punkter dämpningen beskrivs av en kontinuerlig kurva, vilken för enkelhets skull valts till en rät linje. I intervallet $0.03 < \sqrt{h}/A_t < 0.032$ kommer denna räta linje och ovan angivna linje $k = 1$ för $\sqrt{h}/A_t < 0.032$ dels att skära och dels i viss mån överlappa varandra. Erhållna differenser ryms emellertid väl inom den felmarginal som kan uppkomma vid registrering och utvärdering av försöksresultaten. Med hänsyn härtill har skärningspunkten mellan linjerna valts till $\sqrt{h}/A_t = 0.03 \text{ m}^{1/2}$, varvid för de lägre värdena på öppningsfaktorn k får värdet 1, medan i intervallet $0.03 < \sqrt{h}/A_t < 0.07$ $k \text{ m}^{1/2}$ bestäms ur ekv (9), resulterande i den i fig 22 återgivna kurvan.

Naturligen uppstår frågan varför multiplikatorn väljs som $1/k$ i stället för ett enklare uttryck av formen $\bar{k} = 1/k$. Förklaringen härtill är, att då dämpningen är känd endast i två punkter ($\sqrt{h}/A_t = 0.04 \text{ m}^{1/2}$; $\bar{k} = 1/k = 0.887$ och $\sqrt{h}/A_t = 0.07 \text{ m}^{1/2}$; $\bar{k} = 1/k = 0.625$) en rät linje genom dessa bedöms ge alltför stor avvikelse i intervallet $0.02 < \sqrt{h}/A_t < 0.032 \text{ m}^{1/2}$ från antagen förutsättning om att ekv (6) och (7) i detta intervall beskriver försöksresultaten, och vilka ekvationer ryms i ekv (8) för $k = 1$. En bestämning av skärningspunkten mellan dessa båda linjer ger för övrigt ett värde $\sqrt{h}/A_t \approx 0.025 \text{ m}^{1/2}$, vilket bedömts som otillfredsställande.

En i sammanhanget intressant fråga är hur stor differens som erhålles vid förbränningshastigheten bestämd enligt ekv (8), baserad på resultat från i denna rapport beskriven försöksserie, res-

pektive enligt ekv (5), vilken är det exempelvis i Svensk Byggnorm 67 givna sambandet vid brandbelastning med förbränningshastighets- och strålningsförhållanden approximativt lika dem för träbränsle gällande. För exemplifiering härav förutsattes att brandbelastningen i en ordinär brandcell typ bostadslägenhet har en porositet som för träbål motsvarar ett porositetsfaktorvärde $\phi \geq 0.5 \text{ cm}^{1,1}$, vilket innebär, att ekv (8) övergår i den enklare formen

$$R = \frac{1}{k} (6.66 A\sqrt{h} + 0.070) \quad (11)$$

Antages vidare en brandcell med en omslutningsyta $A_t = 90 \text{ m}^2$ men med i övrigt lika karakteristika som de i försöksserien, erhålles för de fem öppningsfaktorerna $A\sqrt{h}/A_t = 0.02, 0.032, 0.04, 0.07$ och $0.114 \text{ m}^{1/2}$ i tab XI angivna värden på förbränningshastigheten. (I ekv (5) angiven konstant har här valts till 6.0.)

I tab XI beräknade värden på förbränningshastigheten har grafiskt åskådliggjorts i fig 23. I figuren har även inlagts dels den räta linje som beskrivs av ekv (5) dels anpassats en kurva genom de ur ekv (11) bestämda punkterna med hänsyn tagen till tillhörande bivillkor. Som framgår av figuren ger båda sambanden mycket nära överensstämmelse upp till en öppningsfaktor omkring $0.04 \text{ m}^{1/2}$ varefter kurvorna divergerar, där redan vid värdet $A\sqrt{h}/A_t = 0.07 \text{ m}^{1/2}$ ($A\sqrt{h} = 6.3 \text{ m}^{5/2}$) ekv (11) ger en förbränningshastighet som är cirka 30% lägre jämfört med den ur ekv (5) erhållna.

Det bör för övrigt påpekas, att försöksresultaten ger klart belägg för att förbränningshastigheten vid de luftflödesfaktorer som svarar mot öppningsfaktorerna $0.03 < A\sqrt{h}/A_t < 0.07$ icke har en linjär utan asymptotisk tillväxt mot det värde som ges för $A\sqrt{h}/A_t = 0.07 \text{ m}^{1/2}$.

Slutligen bör framhållas, att här återgivna samband endast är giltiga för undersökta brandrum. Väsentliga influenser på i brandcellen erhållen gastemperatur-tidkurva, vilken i stor utsträckning bestämmer den hastighet varmed pyrolysen av trämaterialen sker, är, förutom öppningsfaktor och brandbelastningens porositet, även bränslemängd, bränslets placering i brandrummet, brandcellens geometri och omslutande konstruktioners termiska egenskaper. För brandceller med karakteristika som ej avviker alltför mycket från i denna försöksserie valda, bör dock de återgivna sambanden återspegla hän-

TABELL XI Jämförelse mellan förbränningshastigheten R (kg/min)
bestämd enligt

- a) ekv 5, $R = 6 A\sqrt{h}$, given bl a i svenska byggnormer
b) ekv 11, baserad på i denna rapport beskriven försöksserie.

Antagna förutsättningar: Brandrummets omslutningsyta
 $A_t = 90 \text{ m}^2$, brandbelastning typ träbränsle, porositets-
faktorn $\phi \geq 0.5 \text{ cm}^{1,1}$

$A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$)	A_t (m^2)	$A\sqrt{h}$ ($\text{m}^{5/2}$)	$R_{\text{ekv 5}}$ (kg/min)	$R_{\text{ekv 11}}$ (kg/min)
0.020	90	1.8	10.8	12.1
0.032	90	2.88	17.3	18.7
0.040	90	3.60	21.6	20.9
0.070	90	6.30	37.8	26.1
0.114	90	10.25	61.5	26.1

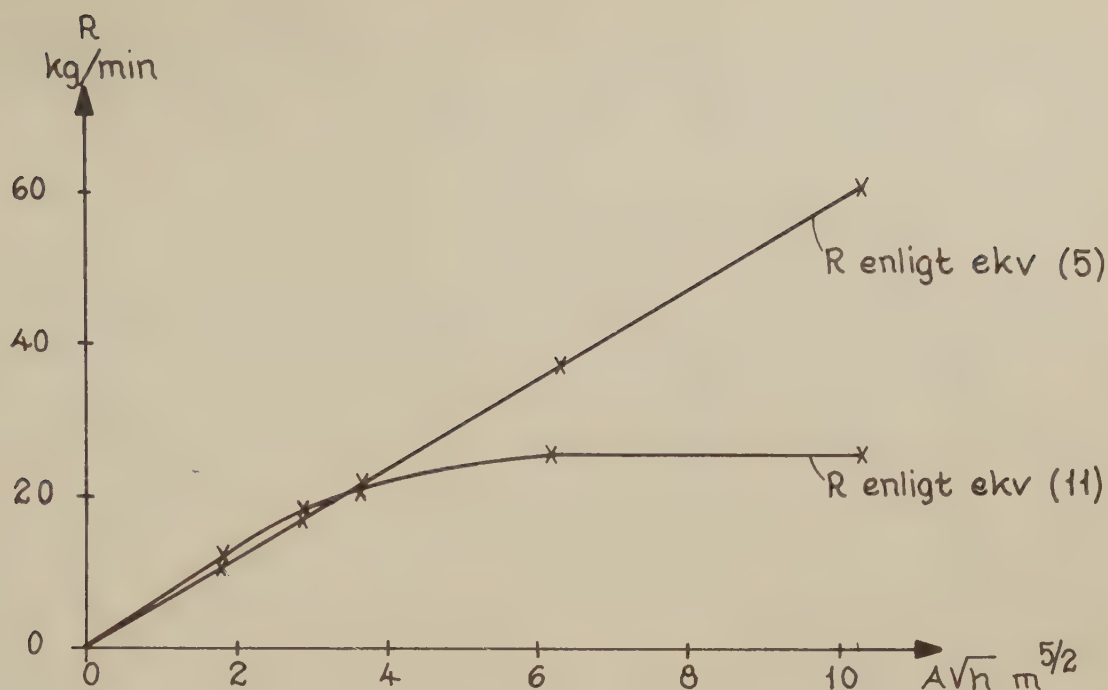


FIG 23 Jämförelse mellan förbränningshastigheten R (kg/min) bestämd enligt

- a) ekv. 5, $R = 6 A\sqrt{h}$, given bl.a. i svenska byggnormer,
- b) ekv. 11, baserad på i denna rapport beskriven försöksserie.

Antagna förutsättningar : brandrummets omslutningsyta
 $A_t = 90 \text{ m}^2$, brandbelastning typ träbränsle, porositets-
 faktorn $\phi \geq 0.5 \text{ cm}^{1,1}$.

delseförloppet väsentligt bättre än vad hittills i litteraturen angivna formel gjort, vilken endast anger förbränningshastigheten som linjärt beroende av luftflödesfaktorn.

5.3 Temperaturkaraktistika

En fullständig redovisning av samtliga registrerade gastemperatur-tidförlopp skulle bli hart när oöverskådlig på grund av det stora antalet försök och mätpunkter. Eftersom vid brandförloppen samtliga faser normalt kunde iakttagas, återges här som illustration endast en gastemperatur-tidkurva, fig 24, erhållen vid försök nr 64 i lilla brandcellen varvid de i punkterna 6 och 18 erhållna värdena utritats. Dessa mätpunkter var belägna inuti brandrummet, centriskt i tak och baksida, på ett avstånd av 30 mm in mot centrum, räknat från omslutande ytor, jfr fig 13. Här kan noteras, att temperaturmaximum uppnås efter cirka 7 minuters brandvaraktighet. Detta sker innan strålningsintensiteten uppnår maximalvärdet och då viktsminskningskurvan börjar plana ut, dvs då flamfasen övergår i glödfas.

Det gastemperatur-tidförlopp som i varje särskilt fall erhålles är karakteristiskt för brandcellen, och beror, förutom av förbränningshastighet och brandvaraktighet i hög grad även av omslutande konstruktions termiska egenskaper. Detta faktum i kombination med det oerhört omfattande material som erhållits under försöksserien skulle vid en fullständig analys medföra en arbetsinsats av sådan omfattning, att denna bedömts oproportionellt stor i förhållande till erhållet utbyte, varför någon sådan bearbetning ej skett. Emellertid föreligger vissa planer på att utnyttja delar av materialet med tillämpning på av Magnusson och Thelandersson /14/ angiven beräkningsmetod för bestämning av under hela brandförloppet per tidsenhet frigjord värmemängd.

Här har istället behandlats dels vid försöken registrerade maximitemperaturer dels medelvärdet av gastemperaturen under flamfasens aktiva del. Förutom en direkt jämförelse mellan vid försöken i respektive brandceller erhållna värden belyses inverkan av varierande skalstorlek.

För redovisning av vid respektive försök uppnådd maximal gastemperatur återges i tab V - VII i kolumnerna 6-8 avläst maximivärde

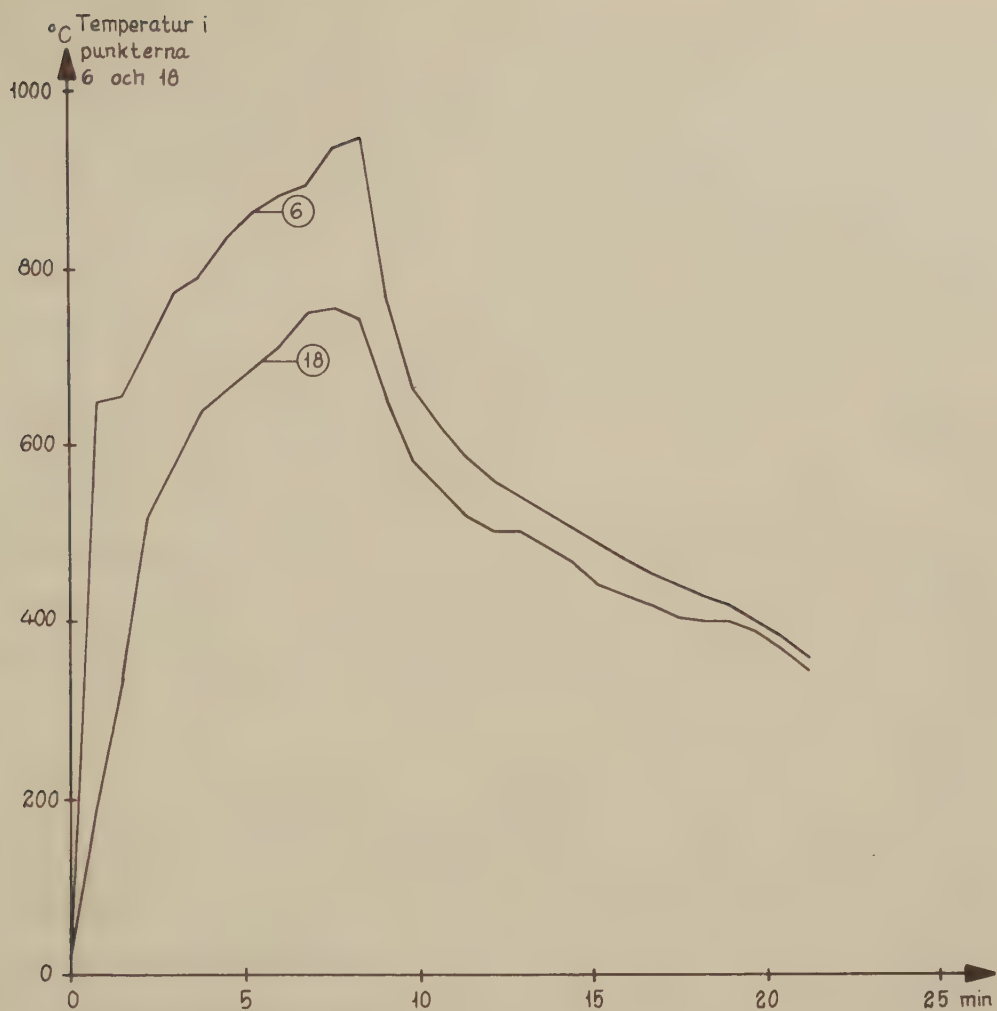


FIG 24 Vid försök upptagna representativa gastemperatur-tidkurvor. (Brandcell $500 \times 500 \times 500 \text{ mm}^3$; $A\sqrt{h}/A_t = 0.040 \text{ m}^{1/2}$; $q = 3.029 \text{ kg}$; $\phi = 0.360 \text{ cm}^{1,1}$)

i mätpunkterna 12, 18 och 24, dvs mittpunkten på varje hel vägg-sida, 30 mm in mot brandrummets centrala del, och i kolumn 9 dessa punkters medianvärde. I fig 31-35 har medianvärdena, vilka sålunda bedömts representativa för uppnådd maximal gastemperatur, sammanställts grafiskt.

Bedömningsgrunder har varit, att med hänsyn till de tre angivna mätpunkternas placering och under flamfasen erhållen turbulens, dessa bör återge karakteristisk gastemperatur i brandcellen under brandförloppet. Någon inverkan av väggens övergångsmotstånd bör ej ha erhållits, ej heller direktkontakt med flammor. Med hänsyn till att i vissa fall en ojämn förbränning av träribbstapeln kan ha skett varvid ett termoelement kan återge låga temperaturvärden medan ett annat återger avsevärt högre t.ex. genom direktkontakt med flammor, har det mellersta ansetts representativt och sålunda valts.

Vid studium av fig 31-35 kan konstateras en förhållandevis kraftig spridning vid porositetsfaktorvärden $\phi < 0.4$ à $0.5 \text{ cm}^{1,1}$. Här kan noteras det intressanta faktum att i detta intervall $0 < \phi < 0.5$, registrerad maximitemperatur är omvänt proportionell mot öppningsfaktorn, dvs en liten öppningsfaktor ger hög gastemperatur och vice versa. Anmärkningsvärt är även att den högsta öppningsfaktorn ger väsentligt lägre brandcellstemperaturer än övriga undersökta, där differensen till närmast liggande, således $A\sqrt{h}/A_t = 0.07 \text{ m}^{1/2}$, kan uppgå till 300 à 400 °C.

I intervallet $\phi > 0.5 \text{ cm}^{1,1}$ sker en viss utjämning, där för de fyra mindre öppningsfaktorvärdena registrerade maximitemperaturer approximativt är lika, medan för den största öppningsfaktorn erhållna värden fortfarande är markant lägre.

Erhållna resultat förklaras av att i brandcellen uppnådd maximal gastemperatur är en funktion av de tre av varandra beroende storheterna brandvaraktighet, förbränningshastighet och ventilation. En större öppningsfaktor ger en högre ventilation och förbränningshastighet, vilket innebär att utvecklad energi per tidsenhet ökar, men samtidigt motverkas detta dels av att brandvaraktigheten minskar men även av att vid ökad ventilation en högre andel av heta brandgaser och strålningsvärme avgår utan att ytterligare återverka på brandförloppet.

I föregående avsnitt 5:2 har visats, att förbränningshastigheten är konstant eller avtagande för $A\sqrt{h}/A_t > 0.07 \text{ m}^{1/2}$. Detta medför att vid en ytterligare ökning av öppningsfaktorn utöver denna gräns, en väsentligt högre ventilation erhålles utan att utvecklad energi ändras. För brandvaraktigheten gäller för höga värden på öppningsfaktorn samma förhållanden som för förbränningshastigheten, dvs denna är approximativt konstant (se avsnitt 5:6). Detta måste innebära, att en icke oväsentlig del av energin bortgår genom fönsteröppningen, vilket som konsekvens ger ovan konstaterade låga gastemperaturer i brandcellen.

I samtliga tre brandceller kan noteras det tidigare berörda fenomenet att en svacka kan iakttagas i temperaturmaximum-porositetsfaktorkurvorna. Detta är emellertid ej lika framträdande som i $R - \phi$ kurvorna.

I avsikt att söka ge en formelmässig sammanfattning av registrerade maximala gastemperaturer har i figurerna 31-35 inlagts räta linjer i intervallen $0.1 < \phi < 0.5$ respektive $\phi > 0.5 \text{ cm}^{1,1}$ med möjligast goda anpassning till vid försöken erhållna resultat. Härvid har beaktats att i det senare intervallet maximitemperaturen approximativt är konstant och oberoende av porositetsfaktorn samt att linjerna skall ha skärningspunkt för $\phi = 0.5$. Bestäms temperaturen ur angivna räta linjer för $\phi = 0.1$ respektive 0.5 erhålles i tab XII givna värden.

Vid analys av tabellen kan konstateras, att för $\phi = 0.1$ kan temperaturen för samtliga öppningsfaktorer med mycket god approximation erhållas ur sambandet

$$\theta_{\max} (\phi = 0.1) = 977 - 4330 A\sqrt{h}/A_t \text{ } ^\circ\text{C} \quad (12)$$

För samtliga brandceller gäller dessutom, att för $\phi > 0.5 \text{ cm}^{1,1}$ är gastemperaturen för öppningsfaktorvärdena $0.02 < A\sqrt{h}/A_t < 0.07 \text{ m}^{1/2}$ approximativt lika, $910 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Detta innebär, att vid brand i en brandcell vid brandbelastning och termiska egenskaper lika här undersökta, kan en förutbestämning av maximala gastemperaturens storleksordning, avhängig av såväl öppningsfaktor som porositetsfaktor ske enligt följande.

För öppningsfaktorvärden tillhöriga intervallet $0.02 < A\sqrt{h}/A_t <$

TABELL XII Maximal gastemperatur $\theta_{\max}$ ($^{\circ}\text{C}$), bestämd ur i FIG 31-35
inlagda linjer för porositetsfaktorn $\phi = 0.1$ respektive $0.5 \text{ cm}^{1,1}$

$\frac{A\sqrt{h}}{A_t}$ ($\text{m}^{1/2}$)	$\theta_{\max}$ ($^{\circ}\text{C}$)	
	$\phi = 0.1$ ($\text{cm}^{1,1}$)	$\phi = 0.5$ ($\text{cm}^{1,1}$)
0.020	870	891
0.032	871	924
0.040	785	920
0.070	690	908
0.114	472	807

TABELL XIII Medeltemperaturen θ_{80-30} ($^{\circ}\text{C}$), bestämd ur i FIG 36-40
inlagda linjer för porositetsfaktorn $\phi = 0.1$ respektive $0.5 \text{ cm}^{1,1}$

$\frac{A\sqrt{h}}{A_t}$ ($\text{m}^{1/2}$)	θ_{80-30} ($^{\circ}\text{C}$)	
	$\phi = 0.1$ ($\text{cm}^{1,1}$)	$\phi = 0.5$ ($\text{cm}^{1,1}$)
0.020	700	674
0.032	734	734
0.040	700	786
0.070	676	795
0.114	434	630

$< 0.07 \text{ m}^{1/2}$ inverkar porositetsfaktorn så att om $0 < \phi < 0.1 \text{ cm}^{1,1}$, kan rätlinjig interpolation ske mellan punkterna ($\phi = 0$, $\Theta_{\max} = 0$) respektive ($\phi = 0.1$, $\Theta_{\max}$ bestämd enligt ekv 12), att om $\phi > 0.5 \text{ cm}^{1,1}$, är gastemperaturen konstant = 900° , dvs oberoende av porositetsfaktorn, att om $0.1 < \phi < 0.5 \text{ cm}^{1,1}$, skall rätlinjig interpolation ske mellan de värden på gastemperaturen som erhålles ovan för $\phi = 0.1$ respektive 0.5 .

För öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t = 0.114 \text{ m}^{1/2}$ sker i intervallen $0 < \phi < 0.1 \text{ cm}^{1,1}$ respektive $0.1 < \phi < 0.5 \text{ cm}^{1,1}$ rätlinjig interpolation mellan punkterna ($\phi = 0$, $\Theta_{\max} = 0$), ($\phi = 0.1$, $\Theta_{\max}$ bestämd enligt ekv 12) respektive ($\phi = 0.5$, $\Theta_{\max} = 807$) medan gastemperaturen för $\phi > 0.5 \text{ cm}^{1,1}$ har ett konstant, av porositetsfaktorn oberoende värde, som är 807°C .

För mellanliggande öppningsfaktorer, dvs $0.07 < A\sqrt{h}/A_t < 0.114 \text{ m}^{1/2}$ kan rätlinjig interpolation ske.

Förutom maximitemperaturen har brandcellens medeltemperatur Θ_{80-30} bestämts under brandförloppens aktiva flamfas. En förutbestämning av denna medeltemperatur och brandvaraktigheten ger en god uppfattning om en eventuell brands återverkan på en brandcells omslutande eller inneslutna konstruktioner.

Medeltemperaturen har vid försöken bestämts under det tidsintervall då brandbelastningens vikt minskar från 80 till 30%, räknat på ursprunglig vikt (jfr definitionen av R_{80-30} , avsnitt 5.2), och vald mätpunkt har härvid varit den av punkterna 12, 18 eller 24 som gett ovan studerat medianvärde. I tab V - VII, kolumn 10 ges erhållna resultat, vilka dessutom sammanställts i fig 36-40.

Vid studium av dessa figurer framgår att en något större spridning erhållits jämfört med de värden som karakteriserar maximitemperaturen. Erhållen spridning måste emellertid bedömas som acceptabel med hänsyn till samtliga de faktorer som påverkar ett brandförlopp.

Av de redovisade sambanden framgår, att medeltemperaturen för $\phi < 0.1 \text{ cm}^{1,1}$ approximativt är oberoende av öppningsfaktorn, och

att för ett konstant ϕ -värde > 0.1 , medeltemperaturen i motsats till maximitemperaturen växer med ökad öppningsfaktor för att uppnå ett maximum vid det ungefärliga öppningsfaktorvärdet $A\sqrt{h}/A_t = 0.07 \text{ m}^{1/2}$. Vid en ytterligare ökning av öppningsfaktorn utöver detta värde följer en successiv nedgång av brandcellens medeltemperatur.

Anpassas för formelsammanfattning, på analogt sätt och med samma bivillkor som för $\theta_{\max}$, rätta linjer i intervallen $0.1 < \phi < 0.5$ respektive $\phi > 0.5$, och bestäms medeltemperaturen för $\phi = 0.1$ respektive $0.5 \text{ cm}^{1,1}$, erhålles i tab XIII givna värden.

Som framgår av tabellen är vid porositetsfaktorvärdet $\phi = 0.1 \text{ cm}^{1,1}$ medeltemperaturen för samtliga öppningsfaktorer $< 0.07 \text{ m}^{1/2}$ approximativt lika, 700°C . Dessutom gäller för porositetsfaktorn $\phi = 0.5$ att medeltemperaturen med tillfredsställande noggrannhet kan beskrivas enligt sambandet

$$\theta_{80-30} (\phi = 0.5) = 657 + 2220 A\sqrt{h}/A_t \quad ^\circ\text{C} \quad (13)$$

Detta innebär sålunda, att för öppningsfaktorvärden $< 0.07 \text{ m}^{1/2}$, kan medeltemperaturen bestämmas enligt följande.

I intervallet $0 < \phi < 0.1 \text{ cm}^{1,1}$ erhålles medeltemperaturen för samtliga öppningsfaktorer genom rätlinjig interpolation mellan punkterna ($\phi = 0$, $\theta_{80-30} = 0$) och ($\phi = 0.1$, $\theta_{80-30} = 700$), i intervallet $\phi > 0.5$ har medeltemperaturen ett konstant värde som ges ur ekv (13),

i mellanliggande intervall, dvs $0.1 < \phi < 0.5 \text{ cm}^{1,1}$, erhålles medeltemperaturen genom rätlinjig interpolation mellan de värden som bestämts ovan för $\phi = 0.1$ respektive 0.5 .

För öppningsfaktorvärdet $A\sqrt{h}/A_t = 0.114 \text{ m}^{1/2}$ kan medeltemperaturen för $\phi < 0.5$ bestämmas genom rätlinjig interpolation mellan punkterna ($\phi = 0$, $\theta_{80-30} = 0$), ($\phi = 0.1$, $\theta_{80-30} = 434$) respektive ($\phi = 0.5$, $\theta_{80-30} = 630$), för $\phi > 0.5 \text{ cm}^{1,1}$ är medeltemperaturen konstant och har värdet 630°C .

För öppningsfaktorvärden i mellanliggande intervall, dvs $0.07 < A\sqrt{h}/A_t < 0.114$, kan rätlinjig interpolation ske.

Det bör framhållas, att här givna samband endast är tillämpliga på brandceller där omslutande konstruktioners termiska egenskaper är lika här behandlade. Dessutom fordras att brandbelastningen är oförändrad, dvs 8.4 Mcal per m^2 omslutningsyta.

5.4 Strålningskarakteristika

Vid brand i en brandcell erhållna strålningskarakteristika är synnerligen väsentliga, då dessa inte bara påverkar det brandrum vari brandförloppet äger rum utan även närbelägna byggnadsdelar. Således kan vid stora fönsteröppningar strålningsvärmen från glödande partiklar och heta brandgaser bli så intensiv, att brännbart byggnadsmaterial i närliggande byggnader eller högre belägna fasader antänds. Alternativt kan fönsterrutorna sprängas sönder av värmen varefter i en annan brandcell en ny brand kan initieras i lättantändliga komponenter genom strålningspåverkan eller direktkontakt med flammor.

För en belysning av den vid brandförloppen utvecklade strålningsintensiteten har för varje brandcell den totala mot en yta infallande värmestrålningen registreras i tre representativa punkter med placering enligt fig 14. Av dessa strålningsmätare gav emellertid endast den som var riktad in mot brandrummets centrala del användbara resultat, medan de värden som registrerades av de båda övriga var för små för att tillfredsställande kunna mätas. Den uppkomna utspänningen från dessa varierade normalt mellan 0 och 1 mV och endast vid några få tillfällen erhöles högre värden, dock aldrig över 1.5 mV, vilket enligt kalibreringskurvorna för strålningsmätarna motsvarar en strålningsintensitet mindre än 10 kW/m^2 . Med hänsyn till att dessa båda mätpunkter dessutom varit anslutna till en punktskrivare där den utspänning som erhållits vid strålningsmaximum kan ha förekommit mellan två stämplingar, kan vid ogynnsamma omständigheter alltför låga värden ha uppmätts, varför slutsatser och jämförelser är vanskliga att dra. Detta har medfört att resultaten från dessa båda strålningsmätare avförts ur diskussionen.

Uppmätt strålningsintensitet från den mätare som var riktad in mot brandrummets centrala del redovisas i fig 41-43.

Vid studium av kurvorna kan för undersökta brandceller konstateras, att öppningsfaktorerna 0.032 och $0.040 \text{ m}^{1/2}$ i stort sett gett samma strålningsintensitet, att öppningsfaktorn $0.114 \text{ m}^{1/2}$ gett något högre samt att i medeltal för öppningsfaktorn $0.070 \text{ m}^{1/2}$ en klart högre och för $0.020 \text{ m}^{1/2}$ en avsevärt lägre strålning registrerats.

Av de erhållna kurvornas inbördes läge får man således ytterligare en verifiering av att vid en extremt stor fönsteröppning, approximativt $A\sqrt{h}/A_t > 0.07 \text{ m}^{1/2}$, en lägre förbränningshastighet erhålles med därav följande konsekvens på brandrummets gastemperatur och utvecklad strålningsintensitet.

Som framgår av fig 14 har, p g a försökstekniska skäl, avståndet mellan strålningsmätaren och brandcellernas front varierat. En omräkning av under försöken registrerad strålningsintensitet till motsvarande erhållen vid ett för samtliga brandceller konstant avstånd, alternativt ett konstant avståndsförhållande, skulle innebära betydande svårigheter. Med hänsyn härtill har ytterligare analys av resultaten från strålningsmätarna ej skett. Möjligen kan problemen lösas genom att utvidga den av Magnusson och Thelandersson /14/ angivna beräkningsmetoden för bestämning av det fullständiga brandförloppet till att omfatta även strålningsintensiteten.

5.5 Skalfaktorn

Vid planeringen av försöksserien var önskemålet inte bara ett klarläggande av porositets- och öppningsfaktorns inverkan på förbränningshastigheten vid brand i slutna brandcell med en fönsteröppning, utan även om möjligt söka bestämma den skalfaktor varmed karakteristiska storheter skall multipliceras vid övergång från en brandcell till en annan, ur dimensionssynpunkt olika, men med lika geometri och lika egenskaper hos omslutande konstruktioner. Intressant är även om i de olika brandrummen vid lika förutsättningar erhållna maximi- och medeltemperaturer visar acceptabel överensstämmelse.

I bakgrunden till dessa frågeställningar ligger kravet på sådana kunskaper om inverkan av skalfaktorer, att såväl framtida prov-

ningar av enskilt material som en bestämning av de parametrar som påverkas av eller påverkar brandförloppet kan utföras i lämpligt avpassade skalmodeller.

I avsnitt 5.2 beskrivs förbränningshastighetens variation med porositets- och luftflödesfaktorn enligt i ekv (8) givet samband med tillhörande bivillkor, vilket kunnat bestämmas på grundval av och i god överensstämmelse med i samtliga brandceller erhållna resultat. Detta innebär dels att vid tillämpning av denna ekvation inverkan av varierande brandcellsdimension automatiskt korrigeras, dels att vid övergång från en skalstorlek till en annan, förbränningshastigheten är proportionell mot omslutningsytan. (Det sistnämnda gäller dock ej för mycket låga värden på luftflödesfaktorn.)

Beträffande maximi- och medeltemperaturen behöver endast noteras, att i fig 31-40 sammanställda värden, vilka resulterat i de i avsnitt 5.3 givna sambanden, innefattar samtliga tre brandceller. Detta innebär, att en varierande brandcellsdimension ej inverkar på gastemperaturen vid i övrigt oförändrade förutsättningar.

5.6 Brandvaraktighet. Exemplifierande jämförelse med normer.

I gällande svenska byggnormer, "SBN 67" och försöksnormen "Aluminiumkonstruktioner", anges, att vid brandbelastning med förbränningshastighets- och strålningsförhållanden, som approximativt överensstämmer med dem för träbränsle gällande, en bestämning av brandens varaktighet får ske enligt sambandet

$$T = \frac{q A_t}{25 A\sqrt{h}} \quad (14)$$

vilket med q i Mcal per m^2 omslutningsyta och $A\sqrt{h}/A_t$ i $m^{1/2}$ ger brandvaraktigheten T i minuter. Här bör noteras, att T anger flamfasens längd, jfr fig 2, vilket enligt ekv (14) innebär att totala i brandcellen magasinerade energin $q A_t$ frigörs under denna tidsperiod. Vid en reell brand återstår emellertid vid flamfasens övergång till glödfas 30-50% av energin, räknat på den ursprungliga, vilken har förbrukats först vid avsvlningsfasens inträdande. Dessutom kan konstateras, att om ovanstående antagande vore riktigt, dvs att totala energin frigörs under flamfasen, detta skulle medföra en väsentligt högre avsvlningshastighet än det i normerna angivna värdet av 10°C per minut.

Ekvation (14) innehåller dessutom termen $25 A\sqrt{h}$. Denna term anger förbränningshastigheten R , bestämd enligt ekv (5), dock med dimension Mcal per minut, och tillämplig vid brandbelastning som i dominerande grad har ett värmevärde approximativt lika trä. Detta innebär, att förbränningshastigheten antages vara konstant under flamfasen för att momentant sjunka till noll då glödfasen inträder. Jämföres detta resonemang med reella förhållanden, exemplifierade i fig 19, kan konstateras att överensstämmelsen är mindre god. Emellertid har en brandvaraktighet bestämd enligt i ekvationen givet samband trots allt visat sig ge acceptabel överensstämmelse med i verkligheten erhållen.

Att söka ange någon längd på brandförloppets antändningsfas måste bedömas som nära nog omöjlig då denna förutom av öppningsfaktor och porositetsfaktor beror av ett stort antal övriga faktorer, exempelvis mängden lättantändliga komponenter, omslutande och inneslutna konstruktioners termiska egenskaper, omgivande lufttemperatur, relativ fuktighet etc.

Vad gäller tidsutsträckningen av brandförloppets glöd- och avsvalningsfas kan konstateras, att av Magnusson och Thelandersson angiven beräkningsmetodik ger möjlighet till en förhållandevis noggrann bestämning av denna /14/.

Vid två brandrum med samma öppningsfaktor innebär ekvation (14), att brandens varaktighet endast blir beroende av brandbelastningen i respektive brandrum. Som en ytterligare konsekvens erhålles att vid lika brandbelastning, brandvaraktigheten blir lika lång oberoende av brandcellens inbördes proportioner.

Med hänsyn till att försöksserien genomförts i tre till geometri lika men till storleken olika brandceller, att brandbelastningen per m^2 omslutningsyta approximativt varit lika stor vid samtliga försök samt att för brandrummen samma värden på öppningsfaktorn studerats, innebär ekvation (14) att för var och en av behandlade öppningsfaktorer brandvaraktigheten i varje brandrum borde bli lika lång. För de undersökta öppningsfaktorerna 0.020, 0.032, 0.040, 0.070 och $0.114 m^{1/2}$ skulle denna således bli 16.8, 10.5, 8.4, 4.8 respektive 3.0 minuter.

Vid studium av vid försöken erhållen, på förbränningskurvorna

uppmåttlängd av flamfasen, tabell V-VII, kolumn 12, vilken således enligt utbildad praxis anger brandvaraktigheten, kan konstateras, att denna vid lika öppningsfaktor med god approximation är lika lång i de tre brandcellerna. Däremot är överensstämmelsen mellan vid försöken erhållna och enligt normerna teoretiskt beräknade varaktigheter ej särdeles god, vilket förklaras av att förbränningshastigheten i normerna förutsättes ha en linjär tillväxt med öppningsfaktorn vilket enligt avsnitt 5.2 är felaktigt. Speciellt är avvikelserna märkbara för $A\sqrt{h}/A_t = 0.020$ respektive $0.114 \text{ m}^{1/2}$ där för den förra en betydligt kortare och för den senare en avsevärt längre varaktighet erhållits. För den större öppningsfaktorn beror detta, som tidigare angivits, på att förbränningshastigheten tillväxer asymptotiskt mot det värde som ges av öppningsfaktorvärdet $0.070 \text{ m}^{1/2}$, varefter vid en ytterligare ökning av öppningsfaktorn ett konstant eller i vissa fall avtagande förbränningshastighetsvärde erhålles.

En i sammanhanget intressant och väsentlig fråga är den kombinerade inverkan av förbränningshastigheten, i brandcellen erhållen gastemperatur samt brandvaraktigheten på omslutande och/eller innesluten konstruktion för öppningsfaktorvärden $> 0.07 \text{ m}^{1/2}$. I den följande diskussionen studeras därvid av naturliga skäl värdena $A\sqrt{h}/A_t = 0.07$ respektive $0.114 \text{ m}^{1/2}$.

I gällande svenska byggnormer anges, att förbränningshastigheten är linjärt beroende av luftflödesfaktorn enligt i ekv (5) givet samband. Detta innebär, att vid två brandceller med ovan angivna öppningsfaktorer, vilka vid känd omslutningsyta ger tillhörande luftflödesfaktor, men med i övrigt lika förutsättningar, den större öppningsfaktorn antages i jämförelse med den mindre medföra en högre energiutveckling och därav åtföljande högre gastemperatur i brandrummet, vilket exempelvis resulterar i ökande krav på isoleringstjocklek av bärande stomme.

Vid studium av avsnitt 5.2 och 5.3 kan på grundval av försöksserien i stället konstateras att vid ökande öppningsfaktor och därmed luftflödesfaktor, förbränningshastigheten är konstant eller i vissa fall minskar samt att i brandcellen registrerad gastemperatur är avtagande. Erhållna resultat, vilka för övrigt verifieras i litteraturen /16, 17/, står i motsats till i normerna

givna rekommendationer. Försöksresultaten innebär emellertid inte automatiskt att en hög öppningsfaktor ger i jämförelse med en lägre en mindre påfrestning på byggnadsstommen såvida inte brandvaraktigheten i studerat intervall förblir konstant eller avtagande. I tabell V-VII, kolumn 12, framgår dock att så är fallet, vilket medför att i dag gällande normer resulterar i överdimensionering av brandcellens stomme när öppningsfaktorn överskrider värdet $0.07 \text{ m}^{1/2}$.

Som framgår av rapporten anges i gällande svenska byggnormer rekommendationer och samband som i vissa fall strider mot under ett brandförlopp erhållna förhållanden. Detta beror primärt på att vid tidpunkten för dessa normers tillkomst kunskapsunderlaget rörande brandförloppets karakteristika var väsentligt mindre än i dagens läge, vilket framtingat normföreskrifter, som för brandceller med högt öppningsfaktorvärde leder till en överdimensionering. Till de svenska normernas försvar måste emellertid framhållas att dessa i jämförelse med flertalet andra länders normer representerar betydande framsteg på vägen mot en kvalificerad brandteknisk dimensionering av bärande och avskiljande konstruktioner.

5.7 Resultatredovisning

Fig. 25-30 Förbränningshastighets-tidkurvor

Fig. 31-40 Temperatur-tidkurvor

Fig. 41-43 Strålningsintensitets-tidkurvor

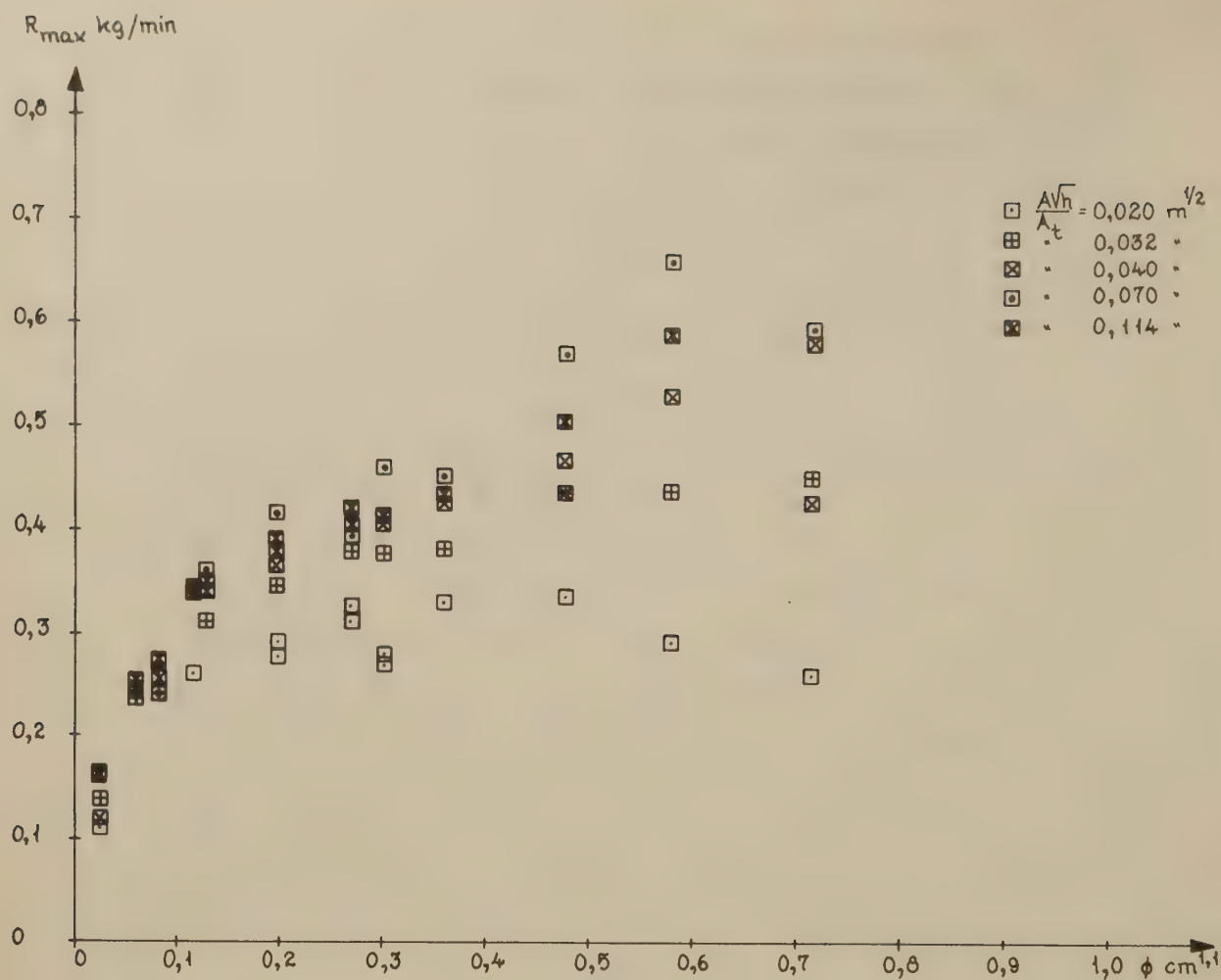


FIG 25 Experimentellt bestämt samband mellan maximal förbränningshastighet $R_{\max}$ (kg/min), porositetsfaktorn ϕ ($\text{cm}^{1,1}$) och öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). Resultatsammanställning för i modellbrandrummet $500 \times 500 \times 500 \text{ mm}^3$ genomförda försök.

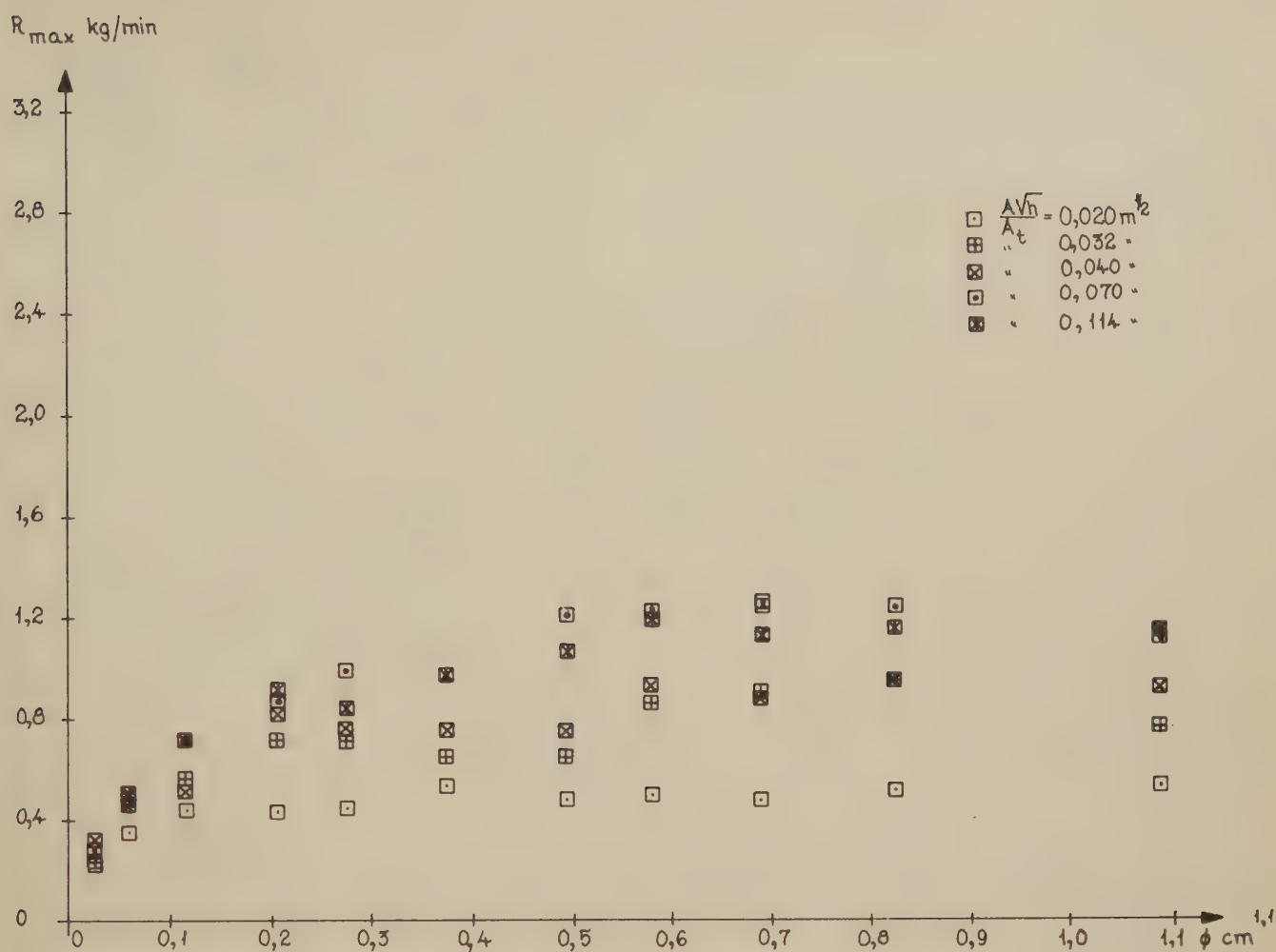


FIG 26 Experimentellt bestämt samband mellan maximal förbränningshastighet $R_{\max}$ (kg/min), porositetsfaktorn ϕ (cm^{1,1}) och öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$ (m^{1/2}). Resultatsammanställning för i modellbrandrummet 750 x 750 x 750 mm³ genomförda försök.

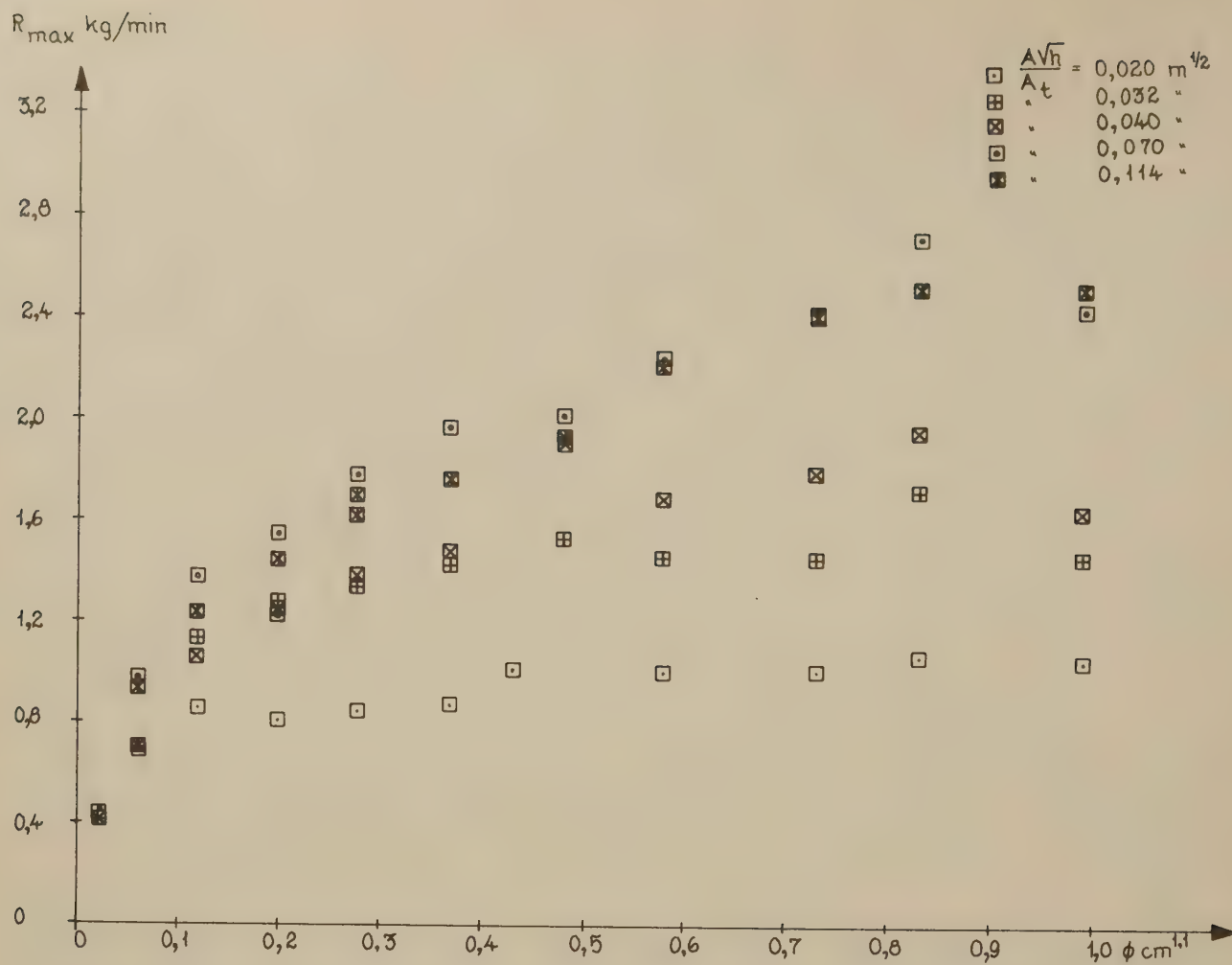


FIG 27 Experimentellt bestämt samband mellan maximal förbränningshastighet $R_{\max}$ (kg/min), porositetsfaktorn ϕ ($\text{cm}^{1,1}$) och öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). Resultatsammanställning för i modellbrandrummet $1000 \times 1000 \times 1000 \text{ mm}^3$ genomförda försök.

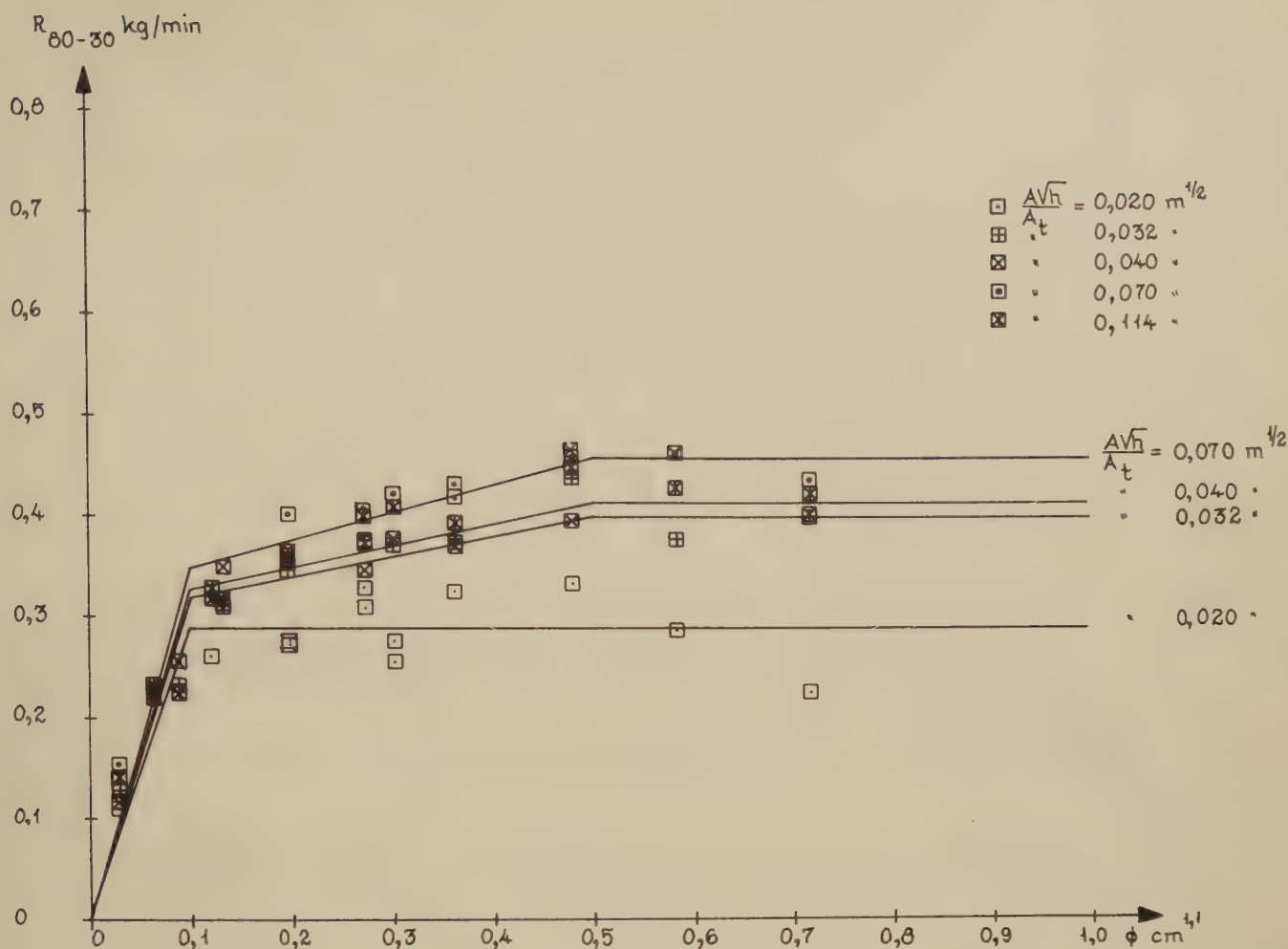


FIG 28 Experimentellt bestämt samband mellan medelförbrännings-
hastigheten R_{80-30} (kg/min), porositetfaktorn ϕ (cm^{1,1})
och öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$ (m^{1/2}). Resultatsammanställ-
ning för i modellbrandrummet 500 x 500 x 500 mm³ genom-
förda försök.

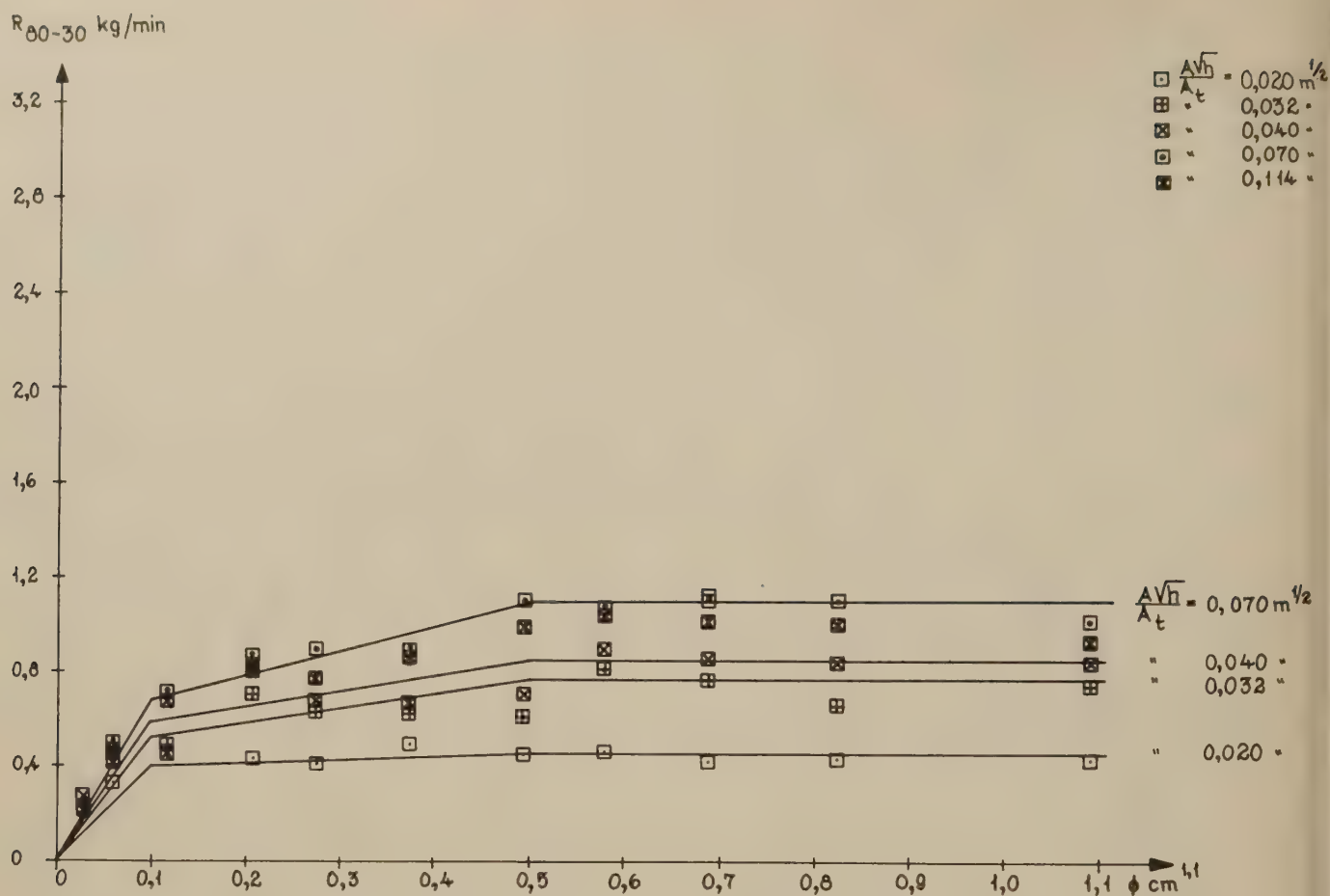


FIG 29 Experimentellt bestämt samband mellan medelförbrännings-
hastigheten R_{80-30} (kg/min), porositetsfaktorn ϕ (cm^{1,1})
och öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$ (m^{1/2}). Resultatsammanställ-
ning för i modellbrandrummet 750 x 750 x 750 mm³ genom-
förda försök.

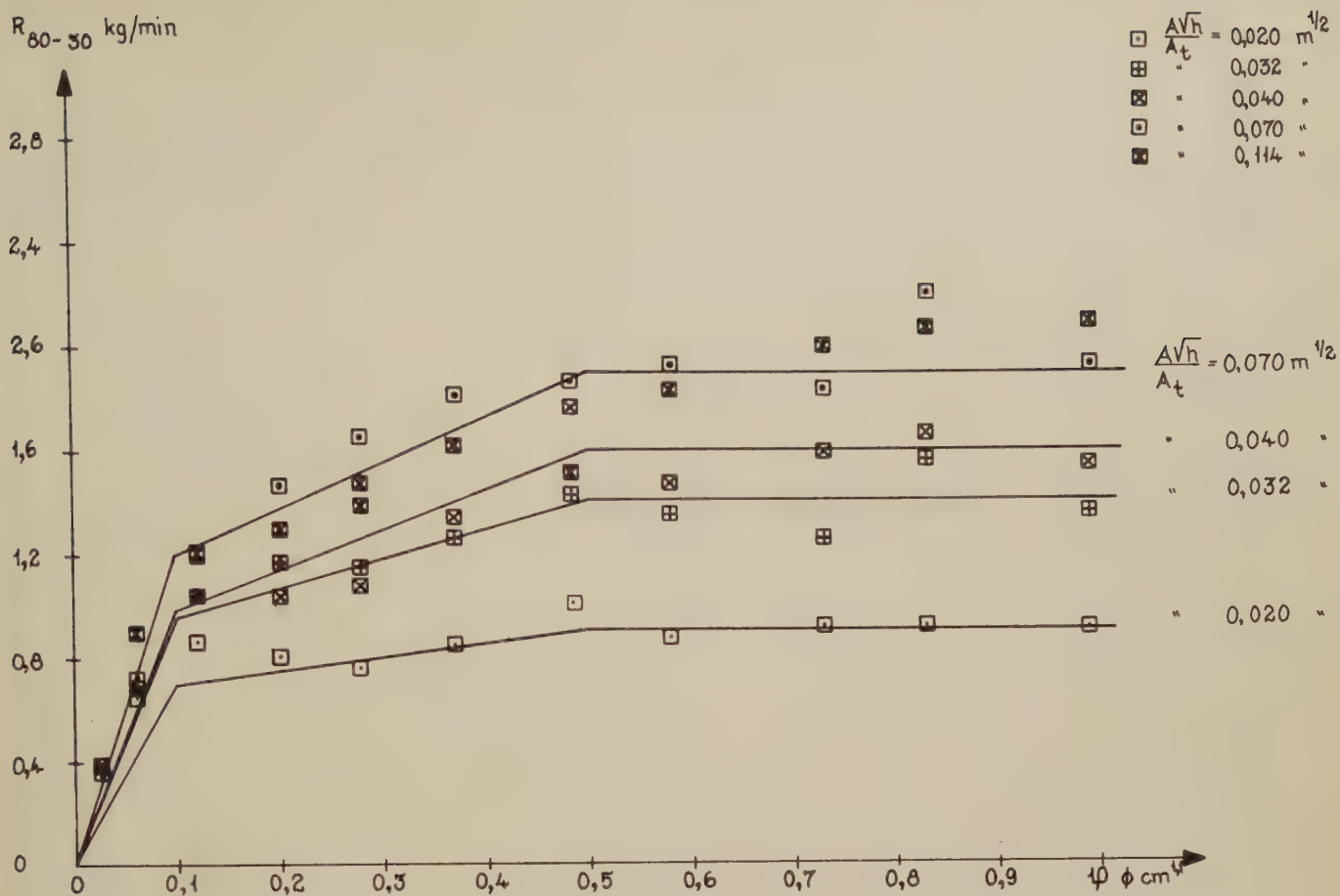


FIG 30 Experimentellt bestämt samband mellan medelförbrännings-
hastigheten R_{80-30} (kg/min), porositetsfaktorn ϕ (cm^{1,1})
och öppningsfaktorn $\frac{\Delta\sqrt{h}}{A_t}$ (m^{1/2}). Resultatsammanställ-
ning för i modellbrandrummet 1000 x 1000 x 1000 mm³ ge-
nomförda försök.

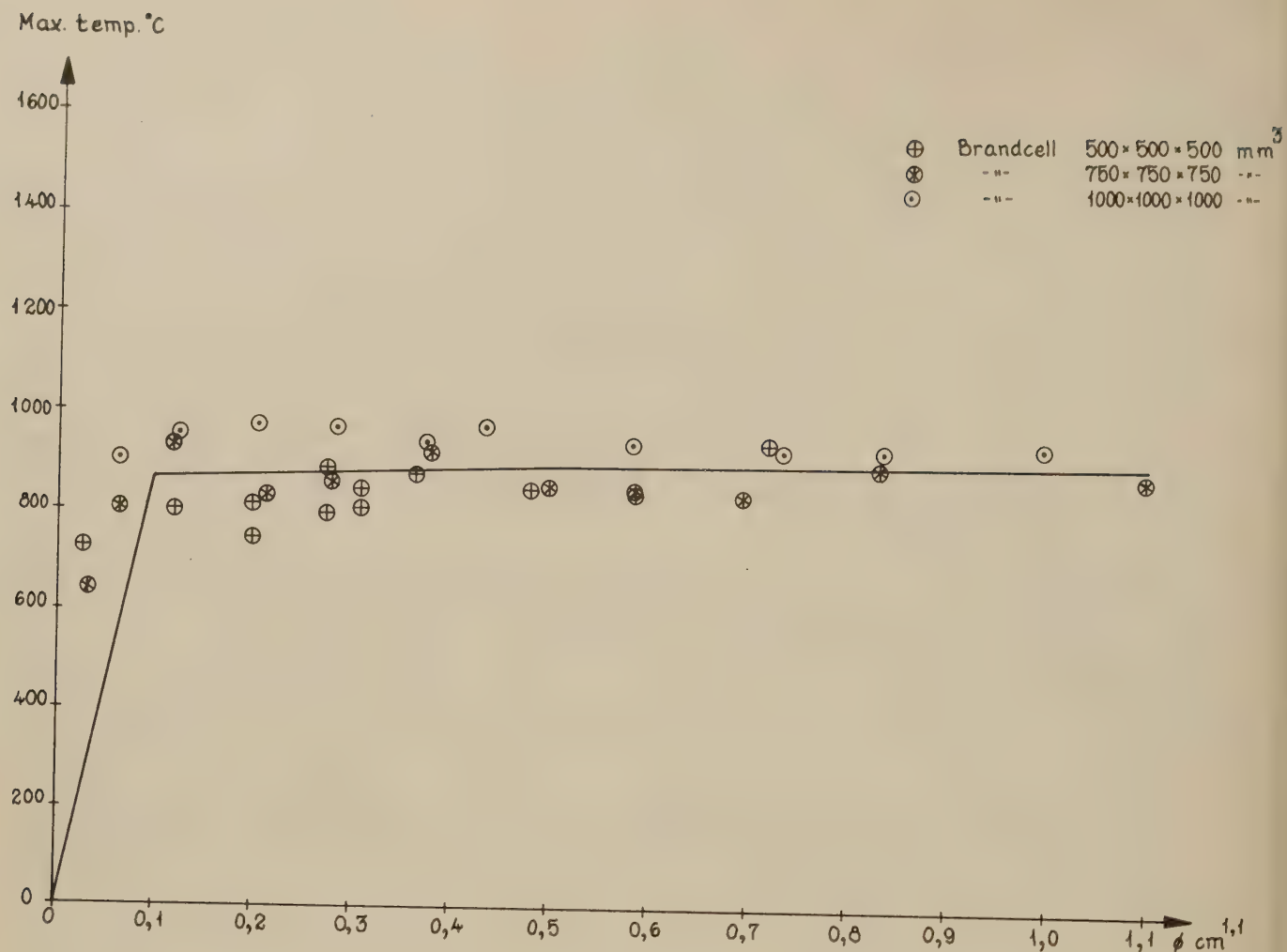


FIG 31 Experimentellt bestämt samband mellan maximala gastemperaturen $\theta_{\max}$ (°C) och porositetsfaktorn ϕ (cm^{1,1}) vid öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t = 0.020 \text{ m}^{1/2}$.

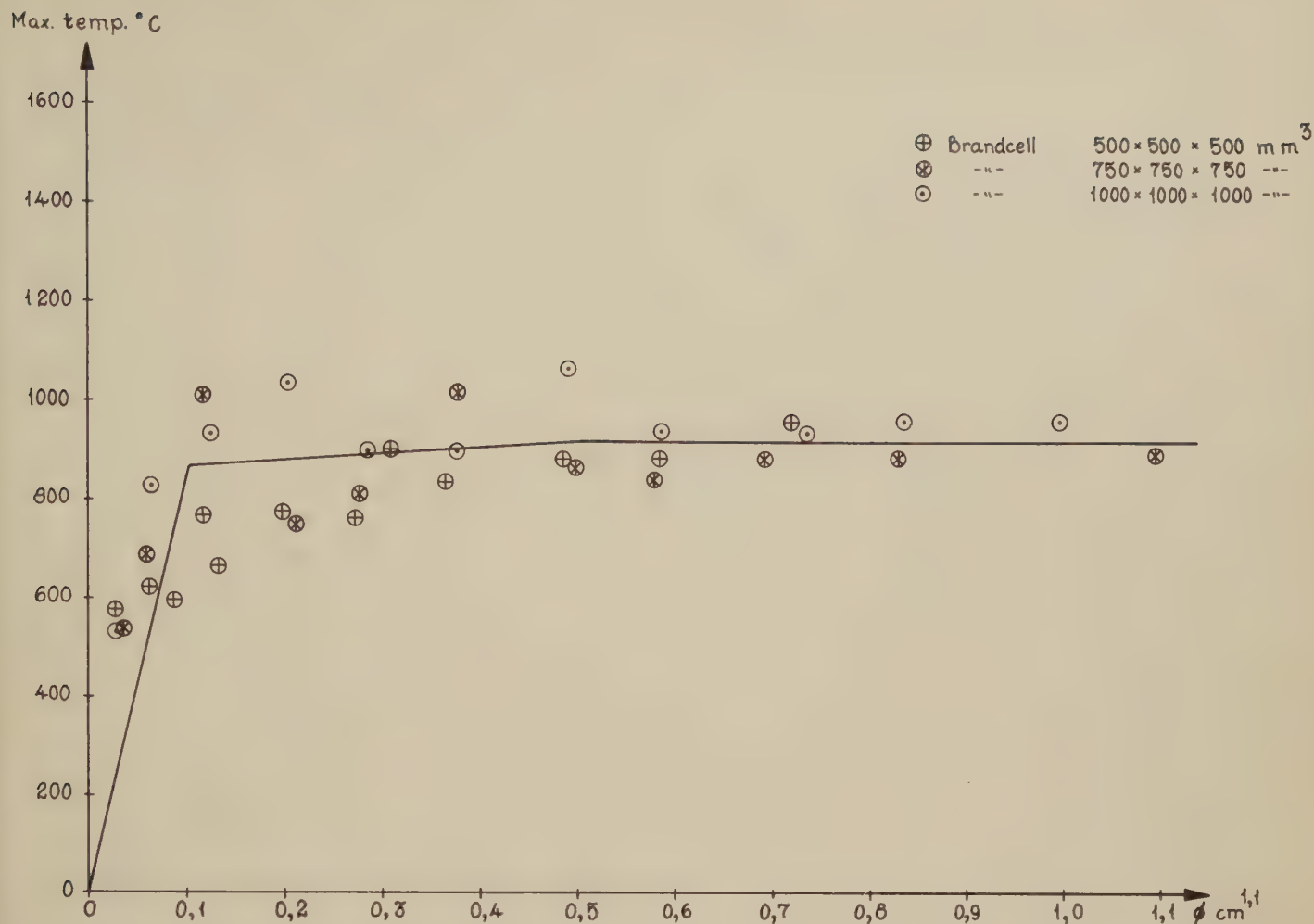


FIG 32 Experimentellt bestämt samband mellan maximala gastemperaturen $\theta_{\max}$ (°C) och porositetsfaktorn ϕ (cm^{1,1}) vid öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t = 0.032 \text{ m}^{1/2}$.

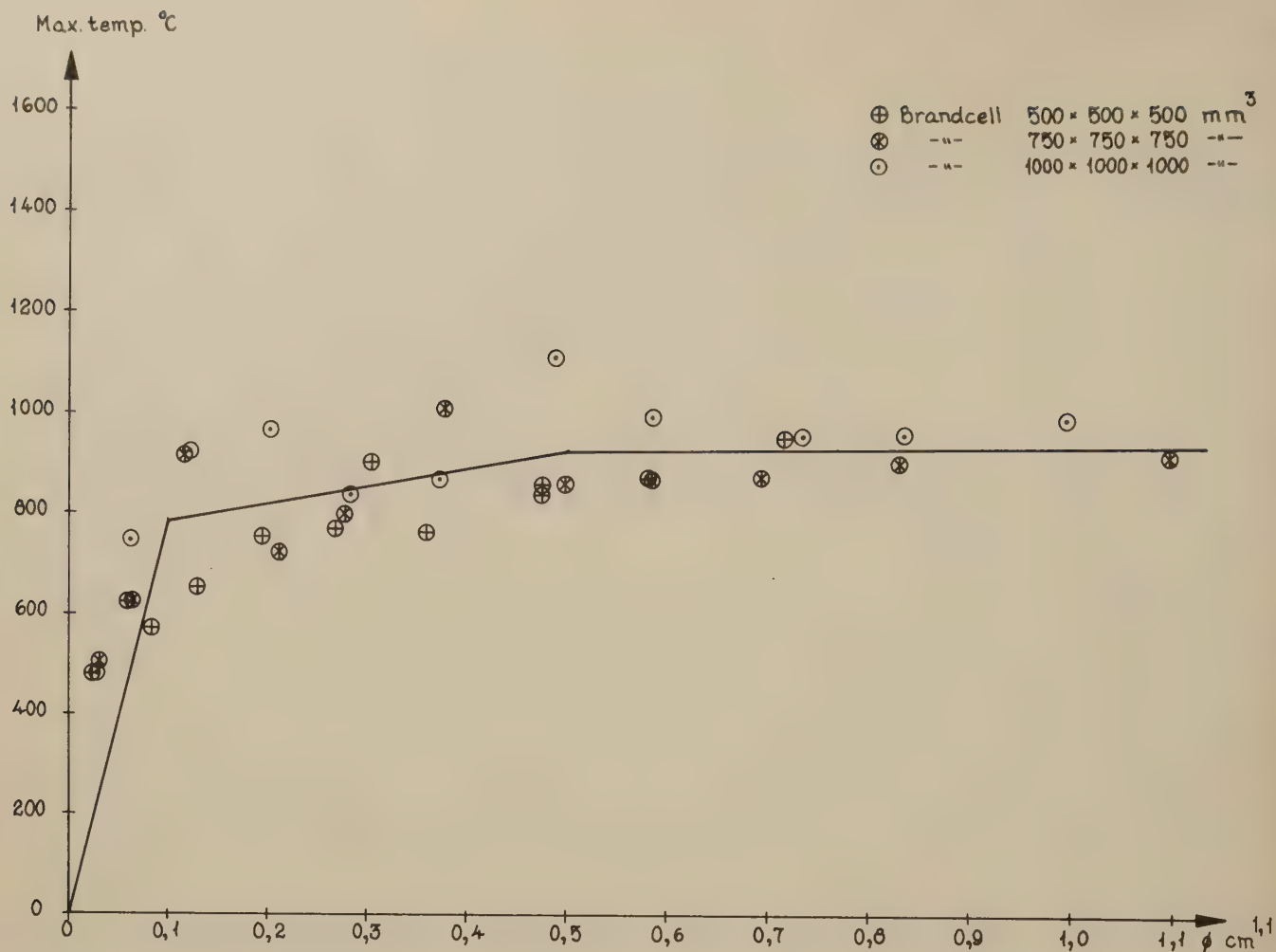


FIG 33 Experimentellt bestämt samband mellan maximala gastemperaturen $\Theta_{\max}$ (°C) och porositetsfaktorn ϕ (cm^{1,1}) vid öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t = 0.040 \text{ m}^{1/2}$.

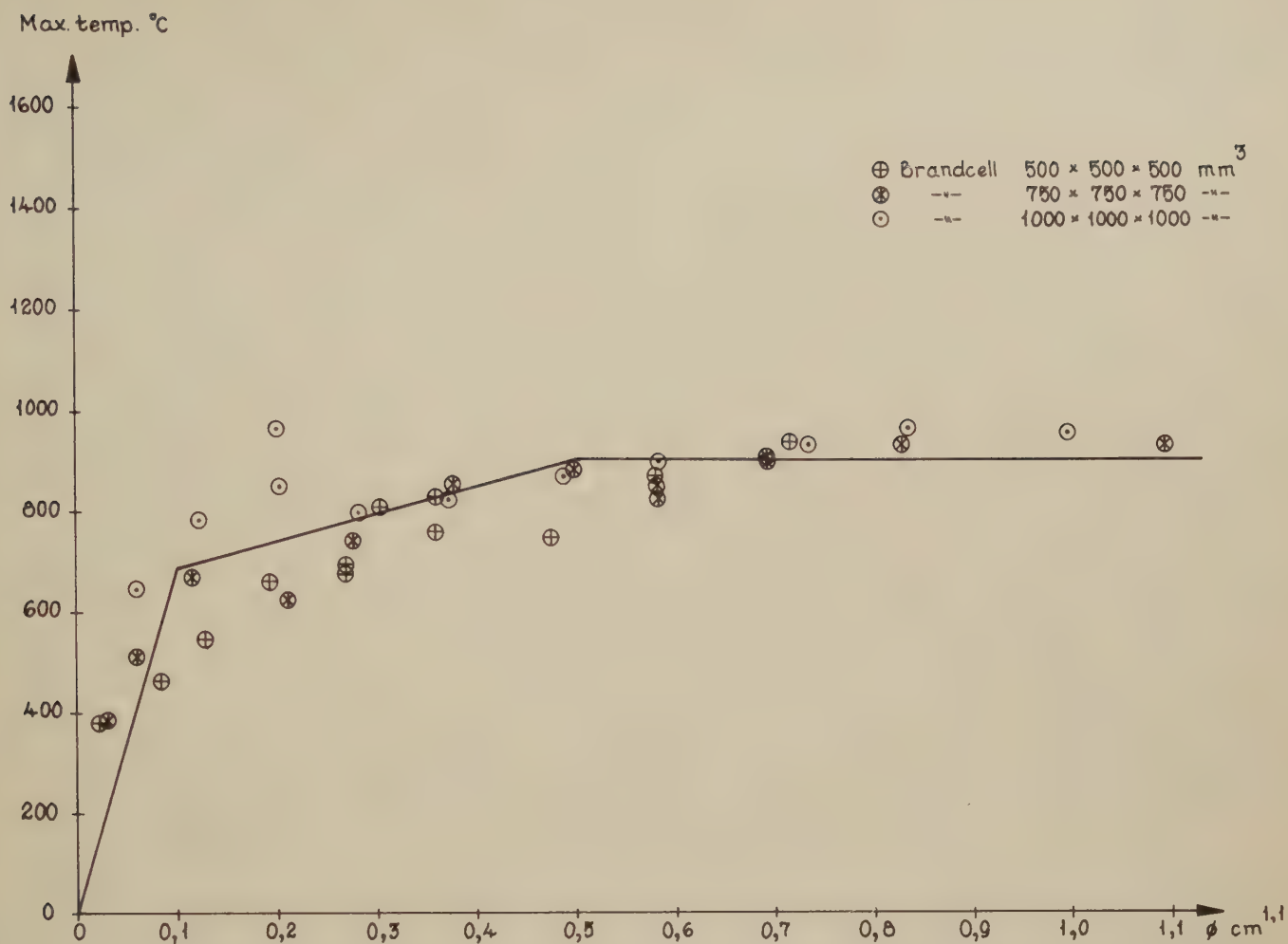


FIG 34 Experimentellt bestämt samband mellan maximala gastemperaturen $\theta_{\max}$ (°C) och porositetsfaktorn ϕ (cm^{1,1}) vid öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t = 0.070 \text{ m}^{1/2}$.

Max. temp. °C

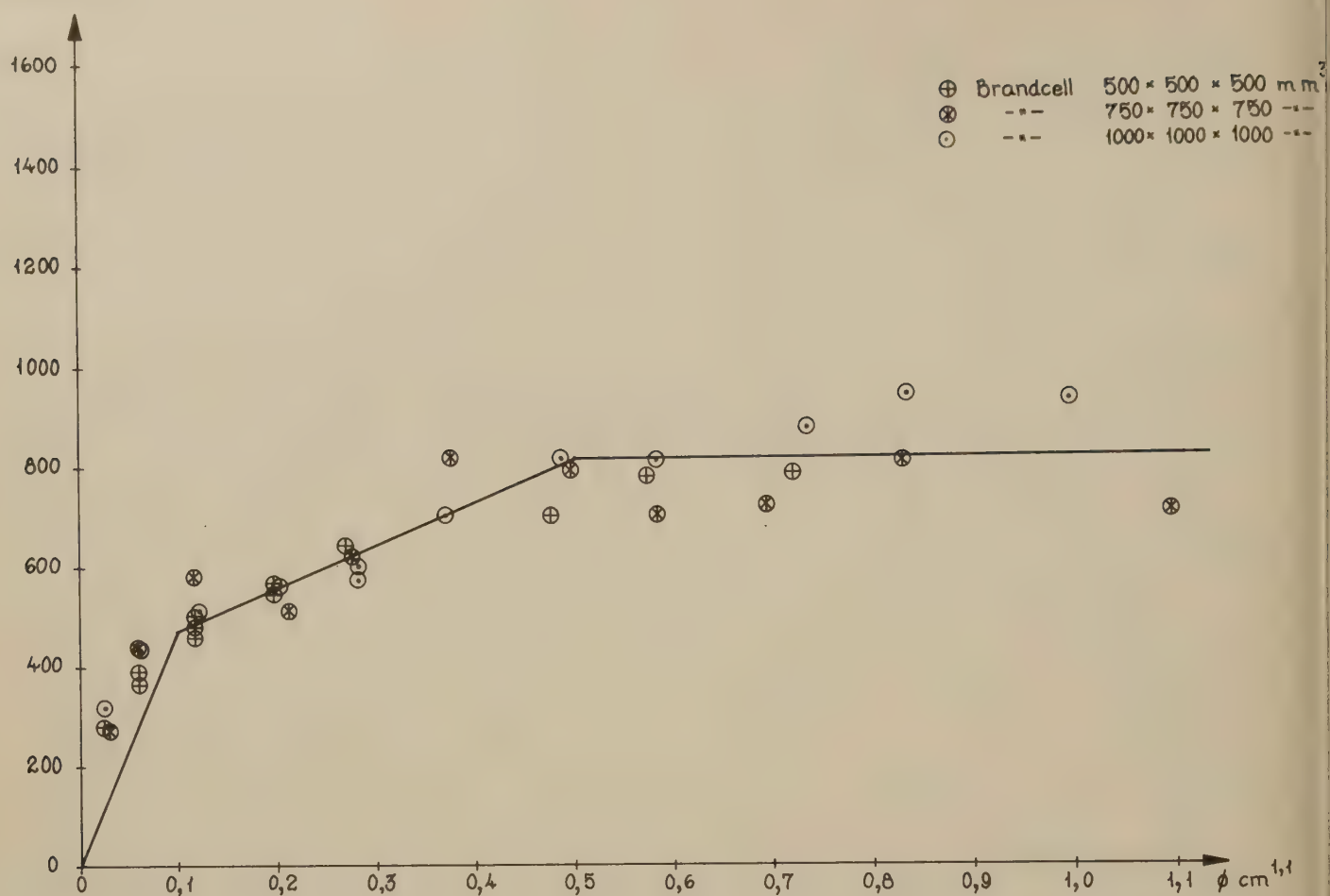


FIG 35 Experimentellt bestämt samband mellan maximala gastemperaturen $\theta_{\max}$ (°C) och porositetsfaktorn ϕ (cm^{1,1}) vid öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t = 0.114 \text{ m}^{1/2}$.

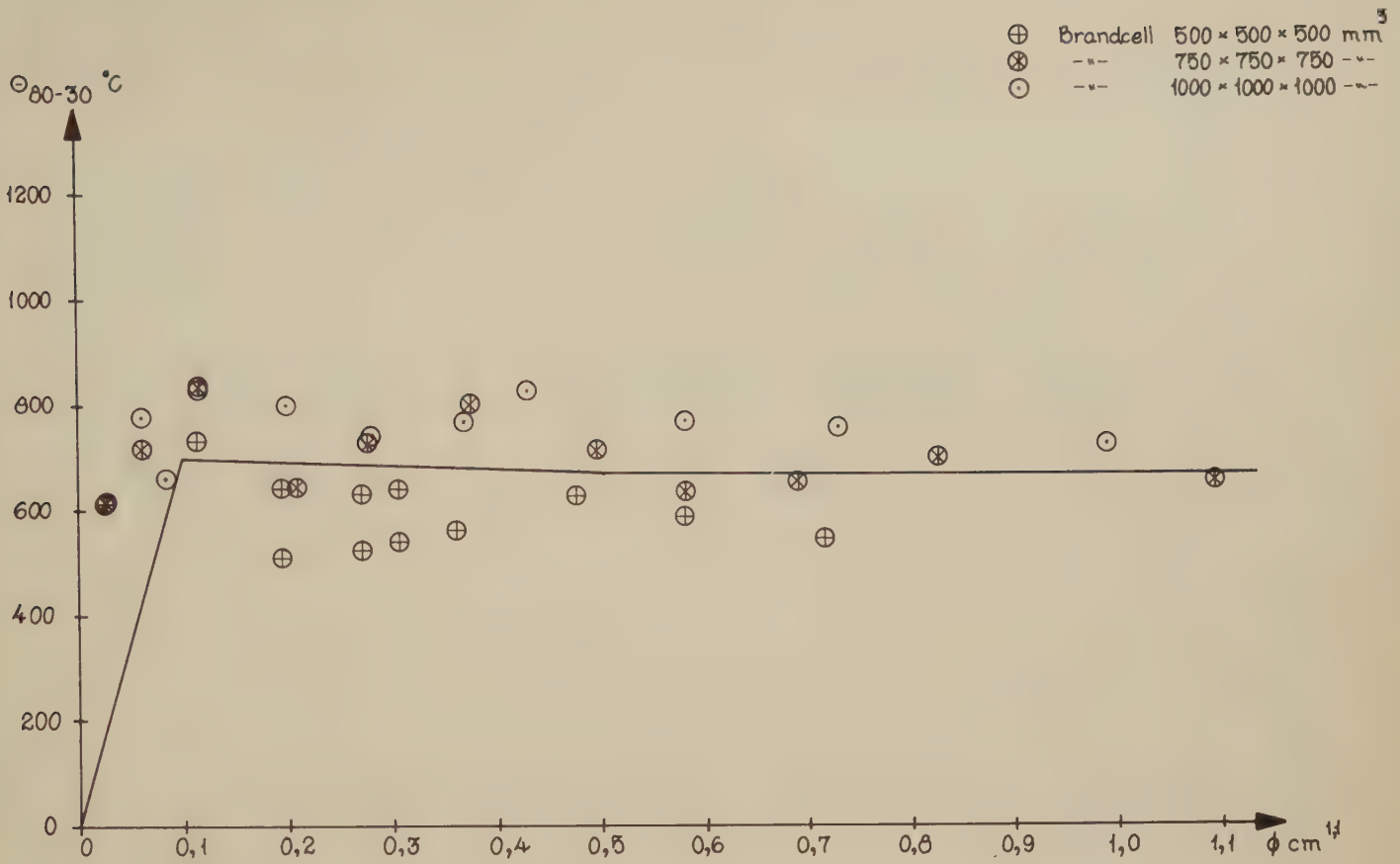


FIG 36 Experimentellt bestämt samband mellan medeltemperaturen Θ_{80-30} (°C) och porositetsfaktorn ϕ (cm^{1,1}) vid öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t = 0.020 \text{ m}^{1/2}$.

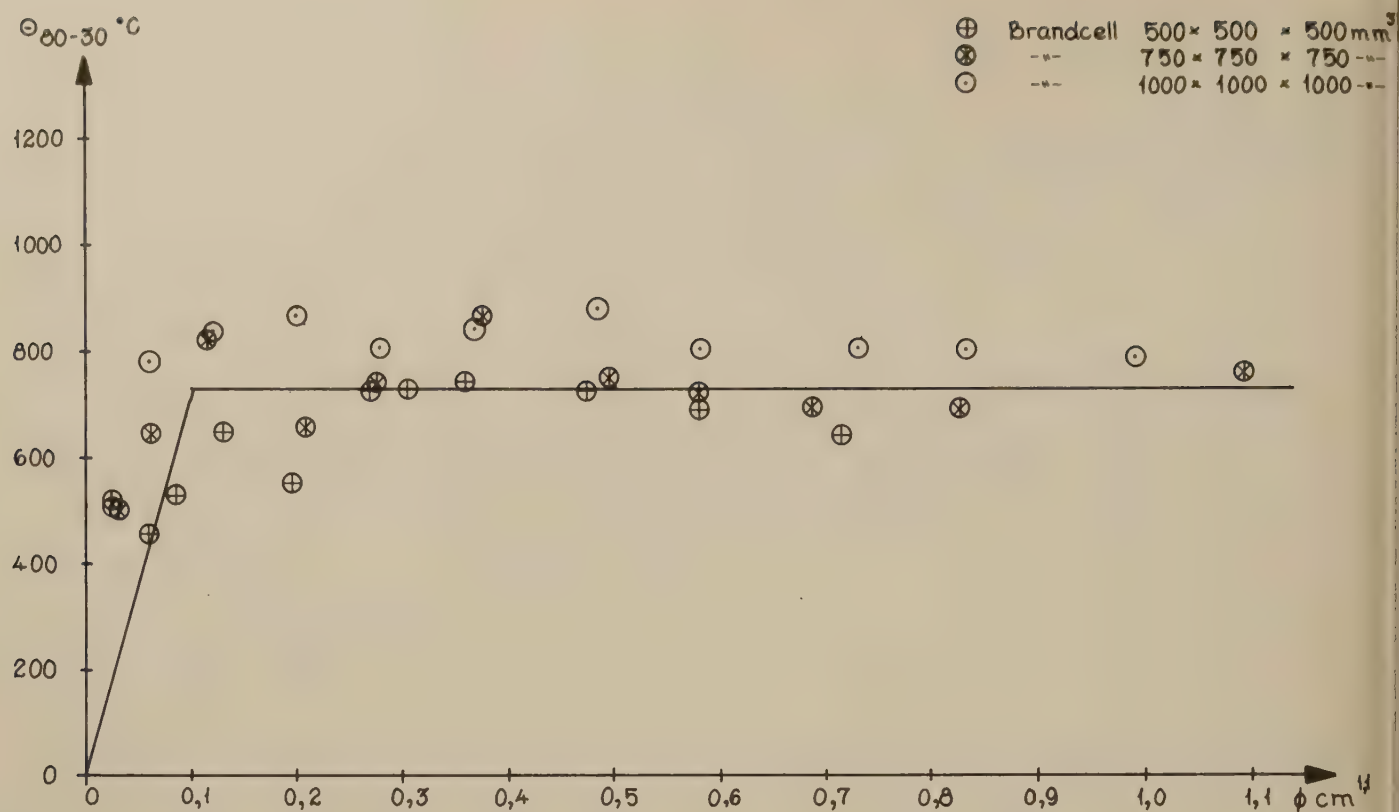


FIG 37 Experimentellt bestämt samband mellan medeltemperaturen Θ_{80-30} (°C) och porositetsfaktorn ϕ (cm^{1,1}) vid öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t = 0.032 \text{ m}^{1/2}$.

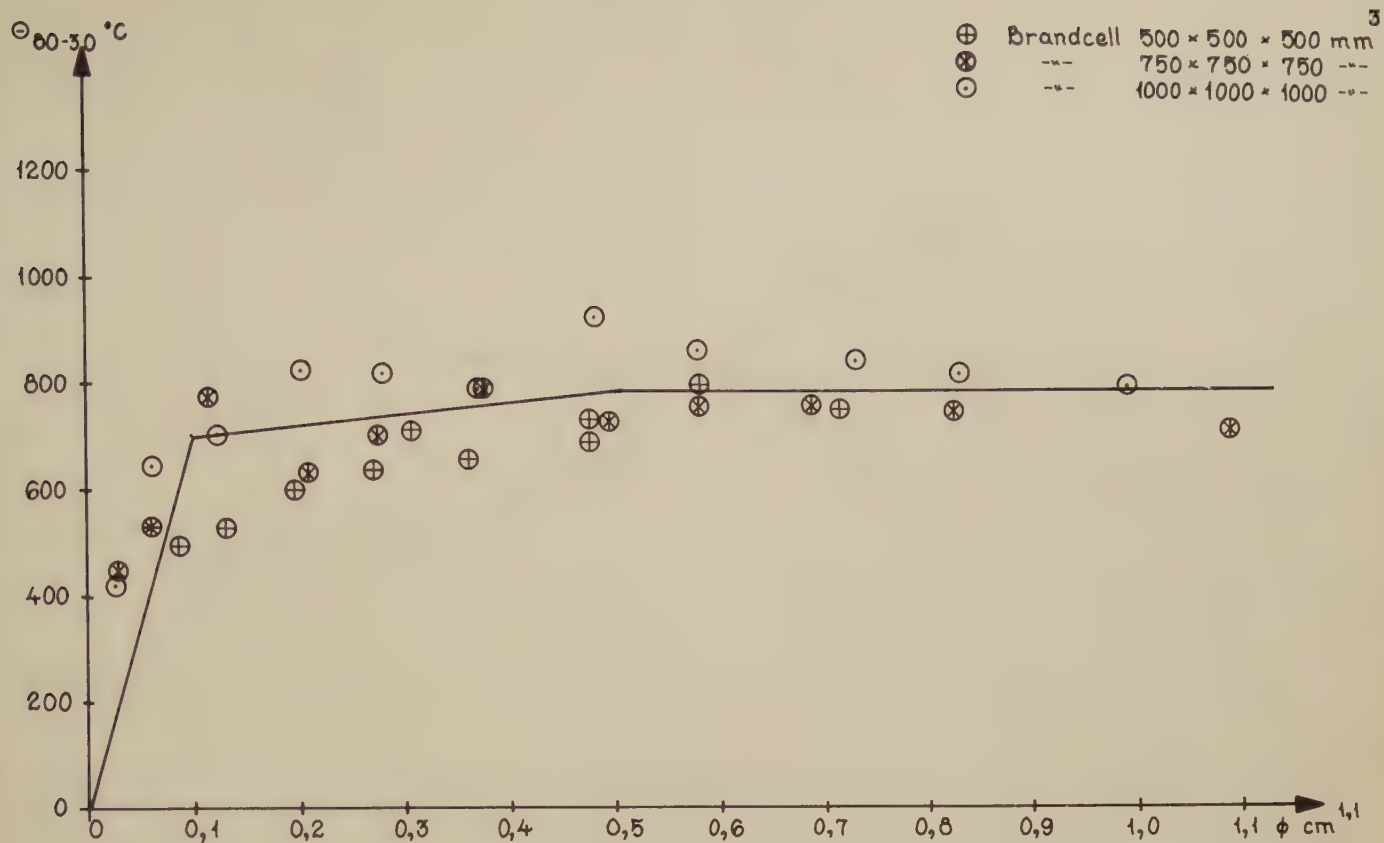


FIG 38 Experimentellt bestämt samband mellan medeltemperaturen Θ_{80-30} (°C) och porositetsfaktorn ϕ (cm^{1,1}) vid öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t = 0.040 \text{ m}^{1/2}$.

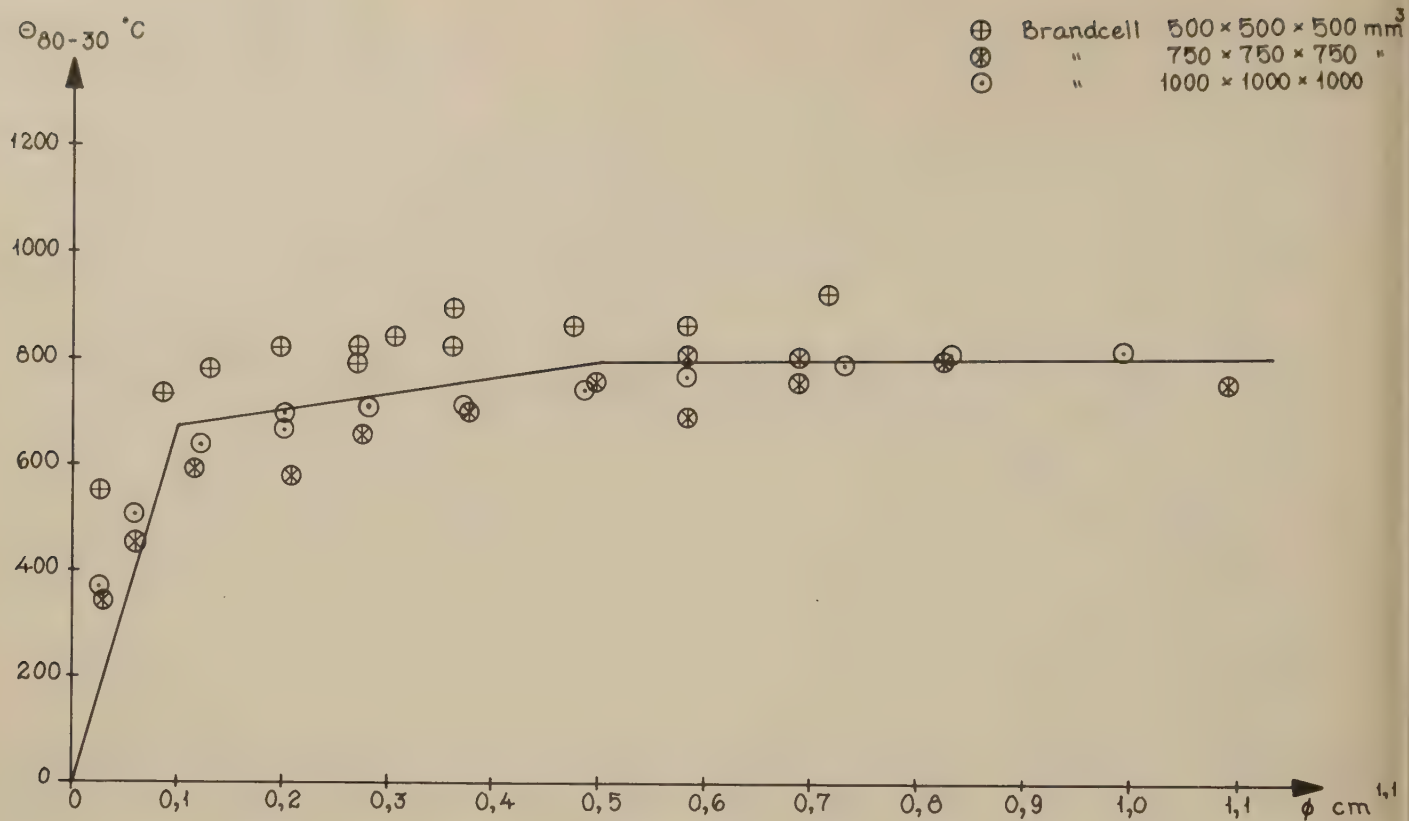


FIG 39 Experimentellt bestämt samband mellan medeltemperaturen Θ_{80-30} ($^{\circ}\text{C}$) och porositetsfaktorn ϕ ($\text{cm}^{1,1}$) vid öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t = 0.070 \text{ m}^{1/2}$.

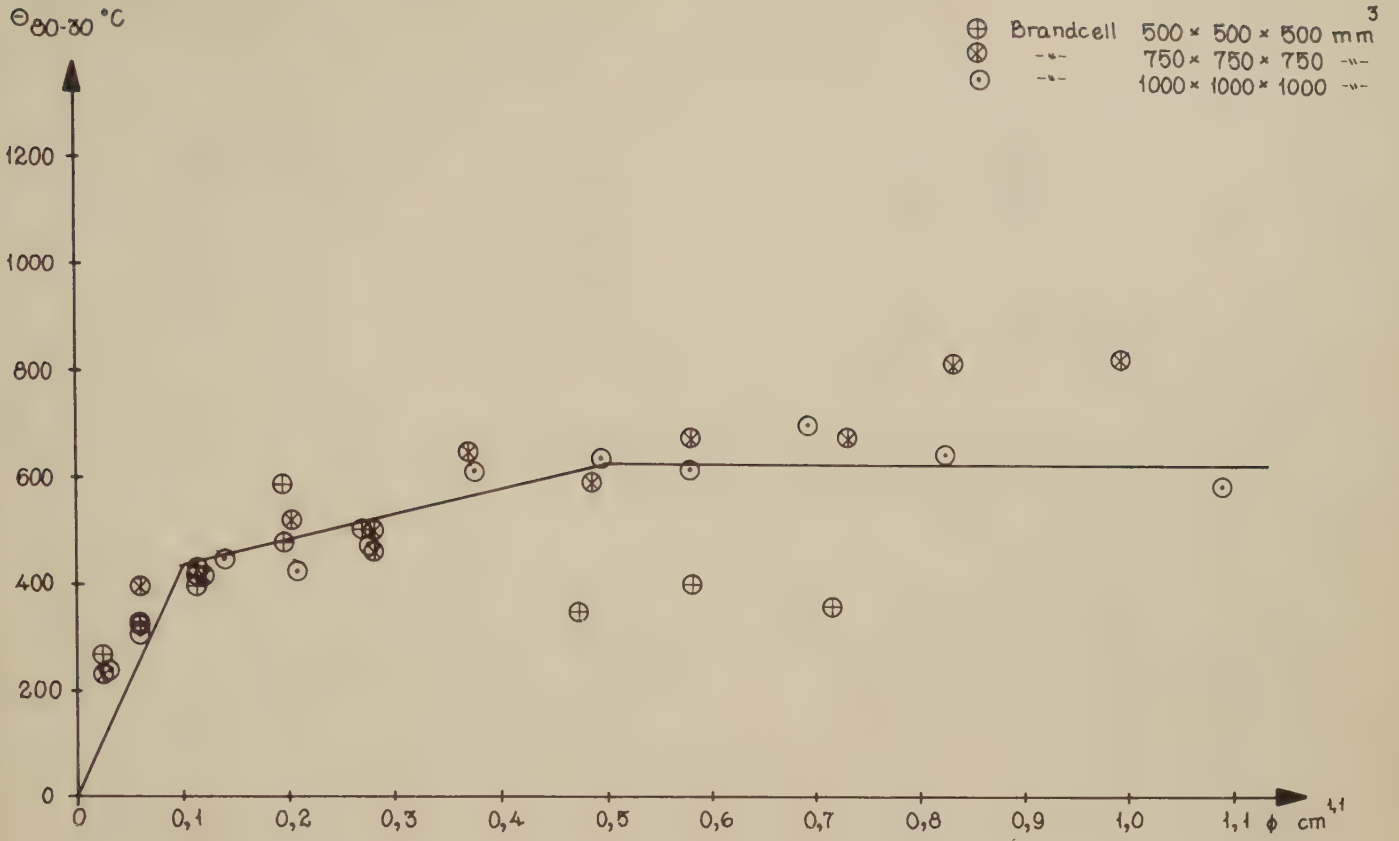


FIG 40 Experimentellt bestämt samband mellan medeltemperaturen $\Theta_{80-30} \text{ (} ^\circ\text{C)}$ och porositetsfaktorn $\phi \text{ (cm}^{1,1}\text{)}$ vid öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t = 0.114 \text{ m}^{1/2}$.

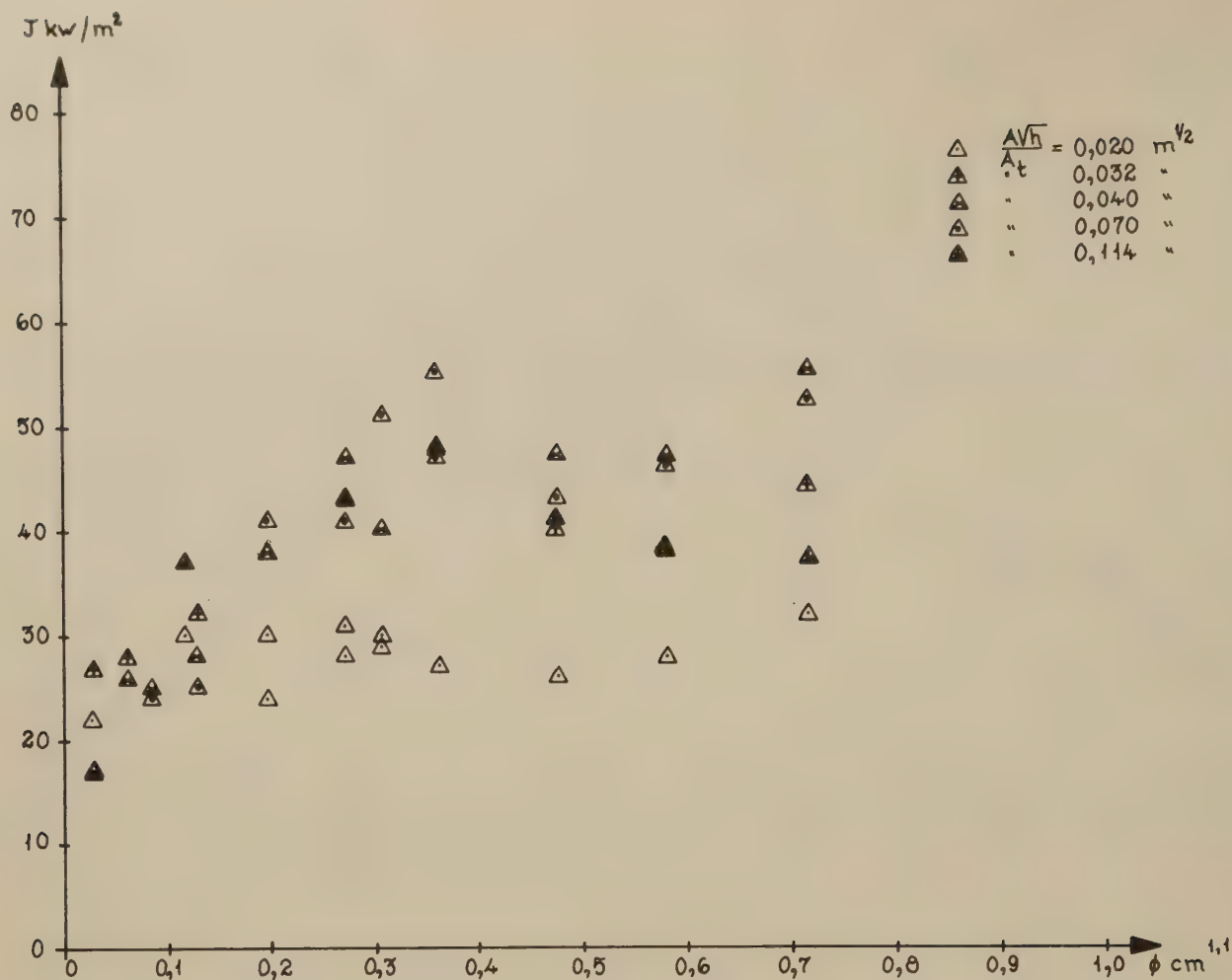


FIG 41 Experimentellt bestämt samband mellan uppmätt maximal strålningsintensitet I (kW/m^2), porositetsfaktorn ϕ ($\text{cm}^{1,1}$) och öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). Resultatsammanställning för i modellbrandrummet $500 \times 500 \times 500 \text{ mm}^3$ genomförda försök.

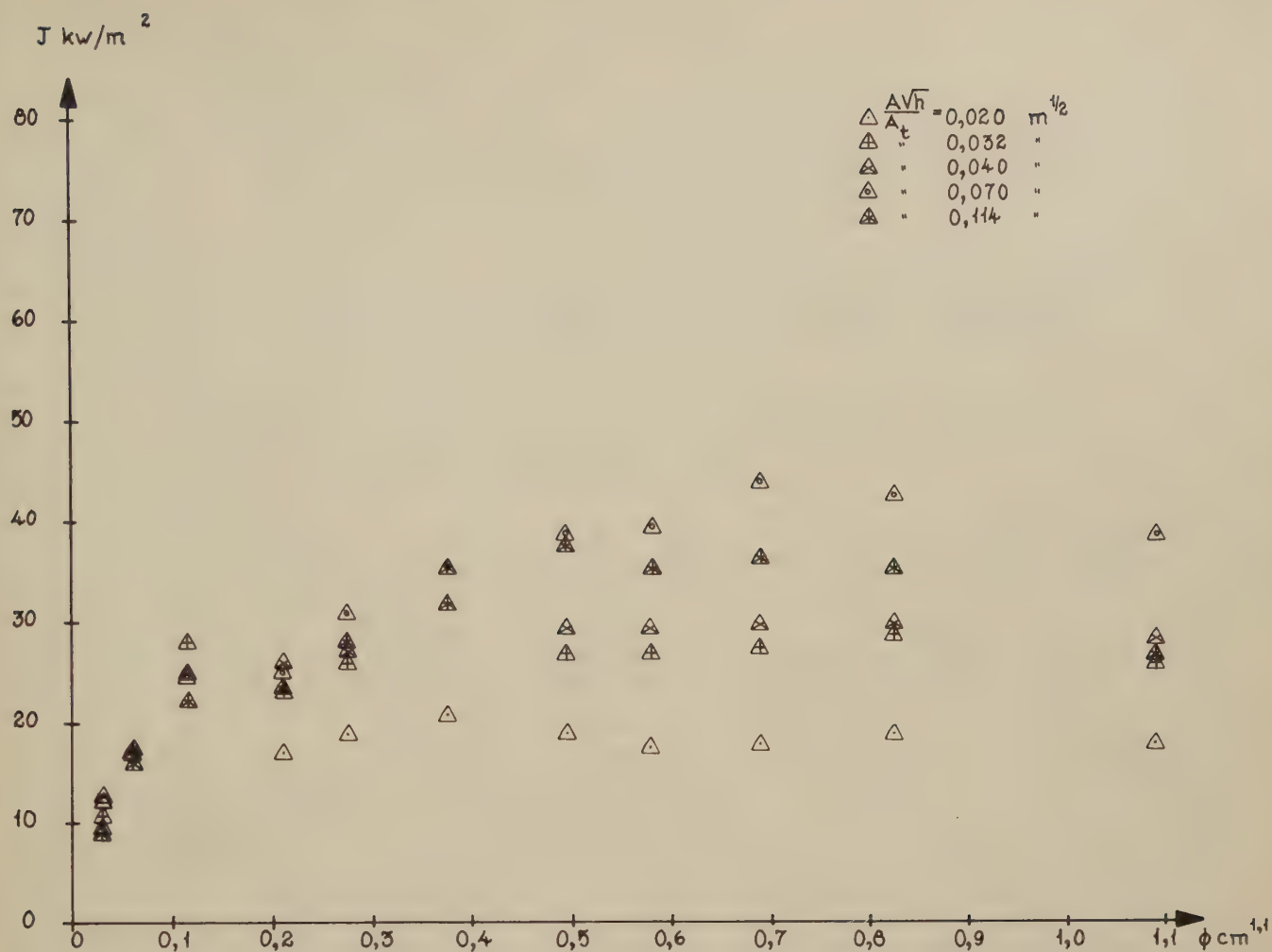


FIG 42 Experimentellt bestämt samband mellan uppmätt maximal strålningsintensitet I (kW/m^2), porositetsfaktorn ϕ ($\text{cm}^{1,1}$) och öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). Resultatsammanställning för i modellbrandrummet $750 \times 750 \times 750 \text{ mm}^3$ genomförda försök.

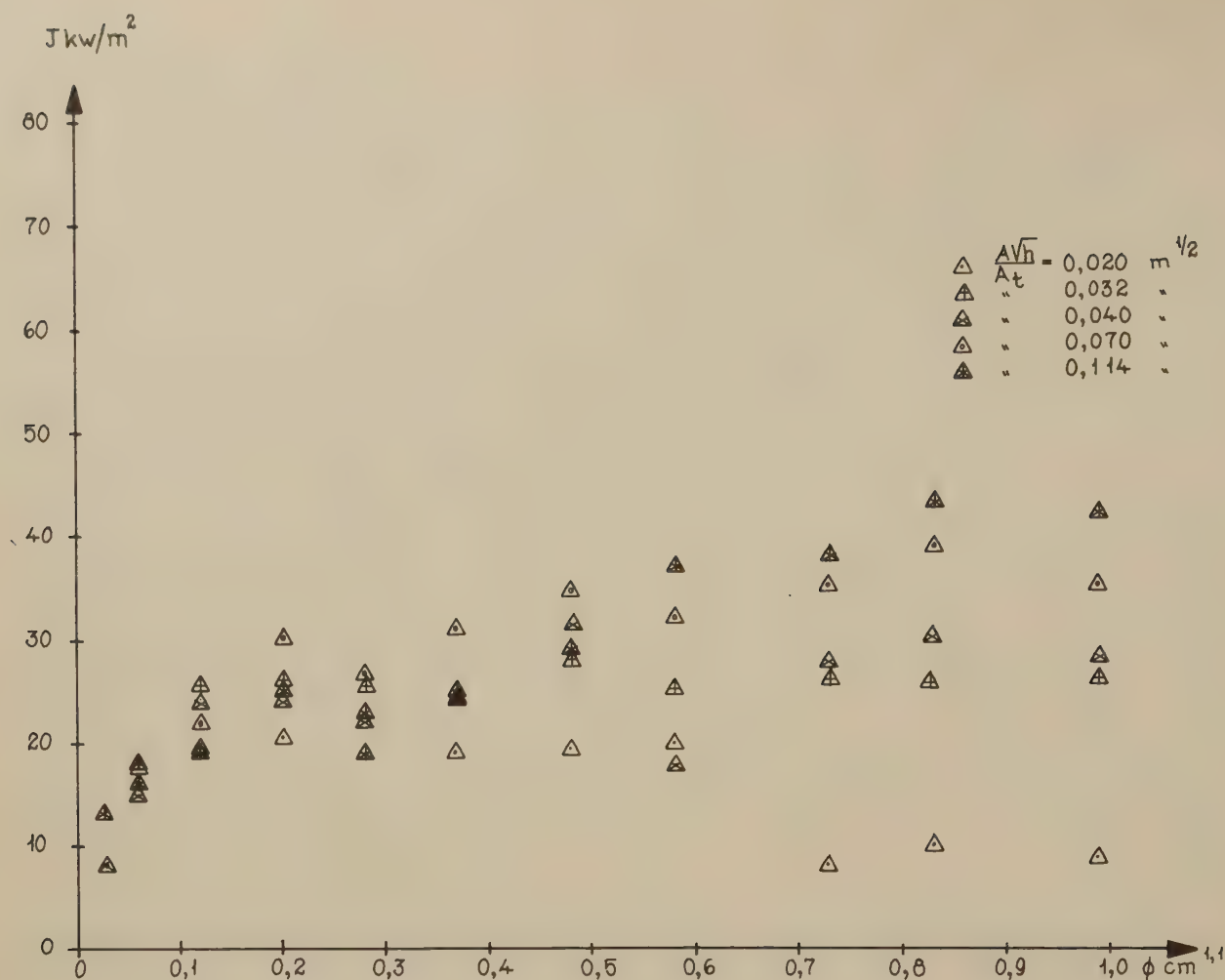


FIG 43 Experimentellt bestämt samband mellan uppmätt maximal strålningsintensitet I (kW/m^2), porositetsfaktorn ϕ ($\text{cm}^{1,1}$) och öppningsfaktorn $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). Resultatsammanställning för i modellbrandrummet $1000 \times 1000 \times 1000 \text{ mm}^3$ genomförda försök.

LITTERATUR

- /1/ Pettersson O., 1965, Structural Fire Engineering Research Today and Tomorrow. Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building Construction Series No. 33, Stockholm.
- /2/ Pettersson O. - Ödeen K., 1968, Pågående och planerad byggnadsteknisk brandforskning i Sverige. Rapport från Byggforskningen 34/68, Stockholm.
- /3/ Faure J., 1961, Study of Convection Currents Created by Fires of Large Area. International Symposium on the Use of Models in Fire Research, Washington.
- /4/ Thomas P.H., 1960, Some Studies of Models in Fire Research. VFDB (Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes) Zeitschrift, Heft 3, Sonderheft, Stuttgart.
- /5/ Gross D., 1962, Experiments on the Burning of Cross Piles of Wood. Journal of Research of the National Bureau of Standards. Vol. 66 C, No. 2, April-June.
- /6/ Kawagoe K., 1958, Fire Behaviour in Rooms. Building Research Institute, Report No. 27, Tokyo.
- /7/ Simms D.L. - Hird D. - Wraight H.G.H., 1960, The Temperature and Duration of Fires. Some Experiments with Models with a Restricted Ventilation. Department of Scientific and Industrial Research and Fire Offices' Committee Joint Fire Research Organization, F.R. Note No. 412.
- /8/ Thomas P.H., 1960, Studies of Fires in Buildings Using Models, Part 1. Research, London. Vol. 13, No. 2, pp 69-77.
- /9/ Gross D. - Robertson A.F., 1965, Experimental Fires in Enclosures. Tenth Symposium (International) on Combustion, pp 931-942. The Combustion Institute.
- /10/ Kawagoe K., 1968, Preprints of Papers to be Presented at the Canadian Sessions of the Fourth Triennial Congress. International Council for Building Research Studies and Documentation, Ottawa.
- /11/ Heselden A.J.M - Thomas P.H. - Law M., 1970, Burning Rate of Ventilation Controlled fires in Compartments. Fire Technology, Vol. 6, No. 2, pp 123-125.
- /12/ Ödeen K., 1968, Experimentellt och teoretiskt studium av brandförlopp i byggnader. Rapport från Byggforskningen 23/68, Stockholm.
- /13/ Nilsson L., 1970, Brandbelastning i bostadslägenheter. Rapport från Byggforskningen 34/70, Stockholm.

- /14/ Magnusson S.E. - Thelandersson S., 1970, Temperature-Time Curves for the Complete Process of Fire Development. A Theoretical Study of Wood Fuel Fires in Enclosed Spaces. Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building Construction Series, No. 65, Stockholm.
- /15/ Gunners N-E., 1967, Method of Measurement and Measuring Equipment for Joint Inter-Scandinavian Fire Test on Lining Materials for Buildings at Copenhagen Fire Test House. Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building Construction Series, No. 43, Stockholm.
- /16/ Butcher E.G. - Bedford G.K. - Fardell P.J, 1967, Further Experiments on Temperatures reached by Steel in Building Fires. Proceedings of the Symposium held at the Fire Research Station, Boreham Wood, Herts on 24th January 1967. London.
- /17/ Heselden A.J.M., 1967, Parameters determining the Severity of Fire. Proceedings of the Symposium held at the Fire Research Station, Boreham Wood, Herts on 24th January 1967. London.

CAPTION

- Fig. 1 Gas temperature-time relationship at fire tests carried out according to standard procedures.
- Fig. 2 Main phases of the process of fire development characterized by temperature-time curves of the temperature of the fire cell (—) determined by means of thermocouples sheathed in protective tubes, and of the radiation temperature (---).
- Fig. 3 Experimentally determined relationship between the scaled rate of burning $FRb^{1.6}$ and the porosity factor ϕ characteristic of the pile of wood, for combustion in the open of a square pile of wood cribs /5/.
- Fig. 4 Experimentally determined relationship between the rate of burning R (g/s) and the air flow factor $A\sqrt{h}$ ($\text{cm}^{5/2}$) in three model chambers of different dimensions each with one window opening /9/.
- Fig. 5 Relationship between the rate of burning R (kg/min) and the air flow factor $A\sqrt{h}$ ($\text{m}^{5/2}$), determined for a very great number of fire tests with wood fires in enclosed chambers at a varying scale /10/.
- Fig. 6 a) Temperature-time curve of fire development defining the maximum gas temperature $\theta_{\max}$ and gas temperature values $1/2 \theta_{\max}$ and $1/4 \theta_{\max}$ for the downward sweep of the curve.
b) Variation of $\theta_{\max}$, A_{fl} and A_{gl} with total amount of fuel.
- Fig. 7 The largest model chamber used at the test, seen from the front. The second-largest chamber is designed in analogy with this one.
- Fig. 8 Photograph representative of the two larger model chambers.
- Fig. 9 Representative sideview of the two larger model chambers including part of the measuring system.
- Fig. 10 The smallest model chamber used at the test, with weighing equipment for the fire load.

Fig. 11 Survey of test arrangement and ventilator cowl.

Fig. 12 Representative weight loss curve recorded during process of fire development. (Fire cell $500 \times 500 \times 500 \text{ mm}^3$; $A\sqrt{h}/A_t = 0.040 \text{ m}^{1/2}$; $q = 3.029 \text{ kg}$; $\phi = 0.360 \text{ cm}^{1.1}$)

Fig. 13 Location and numbering of thermocouples.

Fig. 14 Location of radiation meter 1.

Fig. 15 Calibrating curve for radiation meter 1.

Fig. 16 Representative, experimentally determined radiation-and weight loss curves. (Fire cell $500 \times 500 \times 500 \text{ mm}^3$; $A\sqrt{h}/A_t = 0.040 \text{ m}^{1/2}$; $q = 3.029 \text{ kg}$; $\phi = 0.360 \text{ cm}^{1.1}$)

Fig. 17 Pile of wood cribs with relevant definitions.

Fig. 18 Principal process of ignition of the pile at different porosity factors.

Fig. 19 Variation of rate of burning with time during process of fire development.

Fig. 20 Principal process of variation of rate of burning with opening factor $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$) when porosity factor ϕ is constant.

Fig. 21 Graphic representation of values of rate of burning R_{80-30} (kg/min) obtained in Figs. 28-30, for $\phi = 0.1$ resp. 0.5 ($\text{cm}^{1.1}$) and $A\sqrt{h}/A_t = 0.020, 0.032, 0.040$ and 0.070 ($\text{m}^{1/2}$). These values of ϕ indicate the points of change of direction for the straight lines in Figs. 28-30. For $A\sqrt{h}/A_t = 0.02$ and $0.032 \text{ m}^{1/2}$ the obtained rate of burning lies approximately on the line $R = 4.16 A\sqrt{h} + 0.136 \text{ kg/min}$ for $\phi = 0.1 \text{ cm}^{1.1}$ and on the line $R = 6.67 A\sqrt{h} + 0.069 \text{ kg/min}$ for $\phi = 0.5 \text{ cm}^{1.1}$.

Fig. 22 Variation of factor k with opening factor $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$).

Fig. 23 Comparison between rate of burning R (kg/min) defined according to

a) Eq. 5, $R = 6 A\sqrt{h}$, given in the Swedish building code, e.g.

b) Eq. 11, based on test series described in this report.

Adopted assumptions: enclosing area of the fire cell

$A_t = 90 \text{ m}^2$, fire load of wood fuel type, porosity factor $\phi \geq 0.5 \text{ cm}^{1.1}$.

Fig. 24 Representative gas temperature-time curves recorded during tests. (Fire cell $500 \times 500 \times 500 \text{ mm}^3$; $A\sqrt{h}/A_t = 0.040 \text{ m}^{1/2}$; $q = 3.029 \text{ kg}$; $\phi = 0.360 \text{ cm}^{1.1}$).

Fig. 25 Experimentally determined relationship between maximum rate of burning $R_{\max}$ (kg/min), porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) and opening factor $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). Compilation of results of tests carried out in model chamber $500 \times 500 \times 500 \text{ mm}^3$.

Fig. 26 Experimentally determined relationship between maximum rate of burning $R_{\max}$ (kg/min), porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) and opening factor $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). Compilation of results of tests carried out in model chamber $750 \times 750 \times 750 \text{ mm}^3$.

Fig. 27 Experimentally determined relationship between maximum rate of burning $R_{\max}$ (kg/min), porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) and opening factor $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). Compilation of results of tests carried out in model chamber $1000 \times 1000 \times 1000 \text{ mm}^3$.

Fig. 28 Experimentally determined relationship between mean rate of burning R_{80-30} (kg/min), porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) and opening factor $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). Compilation of results of test carried out in model chamber $500 \times 500 \times 500 \text{ mm}^3$.

Fig. 29 Experimentally determined relationship between mean rate of burning R_{80-30} (kg/min), porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) and opening factor $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). Compilation of results of tests carried out in model chamber $750 \times 750 \times 750 \text{ mm}^3$.

Fig. 30 Experimentally determined relationship between mean rate of burning R_{80-30} (kg/min), porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) and opening factor $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). Compilation of results of tests carried out in model chamber $1000 \times 1000 \times 1000 \text{ mm}^3$.

Fig. 31 Experimentally determined relationship between maximum gas temperature $\Theta_{\max}$ ($^{\circ}\text{C}$) and porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) at opening factor $A\sqrt{h}/A_t = 0.020 \text{ m}^{1/2}$.

Fig. 32 Experimentally determined relationship between maximum gas temperature $\Theta_{\max}$ ($^{\circ}\text{C}$) and porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) at opening factor $A\sqrt{h}/A_t = 0.032 \text{ m}^{1/2}$.

- Fig. 33 Experimentally determined relationship between maximum gas temperature $\theta_{\max}$ ($^{\circ}\text{C}$) and porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) at opening factor $A\sqrt{h}/A_t = 0.040 \text{ m}^{1/2}$.
- Fig. 34 Experimentally determined relationship between maximum gas temperature $\theta_{\max}$ ($^{\circ}\text{C}$) and porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) at opening factor $A\sqrt{h}/A_t = 0.070 \text{ m}^{1/2}$.
- Fig. 35 Experimentally determined relationship between maximum gas temperature $\theta_{\max}$ ($^{\circ}\text{C}$) and porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) at opening factor $A\sqrt{h}/A_t = 0.114 \text{ m}^{1/2}$.
- Fig. 36 Experimentally determined relationship between mean temperature θ_{80-30} ($^{\circ}\text{C}$) and porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) at opening factor $A\sqrt{h}/A_t = 0.020 \text{ m}^{1/2}$.
- Fig. 37 Experimentally determined relationship between mean temperature θ_{80-30} ($^{\circ}\text{C}$) and porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) at opening factor $A\sqrt{h}/A_t = 0.032 \text{ m}^{1/2}$.
- Fig. 38 Experimentally determined relationship between mean temperature θ_{80-30} ($^{\circ}\text{C}$) and porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) at opening factor $A\sqrt{h}/A_t = 0.040 \text{ m}^{1/2}$.
- Fig. 39 Experimentally determined relationship between mean temperature θ_{80-30} ($^{\circ}\text{C}$) and porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) at opening factor $A\sqrt{h}/A_t = 0.070 \text{ m}^{1/2}$.
- Fig. 40 Experimentally determined relationship between mean temperature θ_{80-30} ($^{\circ}\text{C}$) and porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) at opening factor $A\sqrt{h}/A_t = 0.114 \text{ m}^{1/2}$.
- Fig. 41 Experimentally determined relationship between recorded maximum intensity of radiation I (kW/m^2), porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) and opening factor $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). Compilation of results of tests carried out in model chamber $500 \times 500 \times 500 \text{ mm}^3$.
- Fig. 42 Experimentally determined relationship between recorded maximum intensity of radiation I (kW/m^2), porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) and opening factor $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). Compilation of results of tests carried out in model chamber $750 \times 750 \times 750 \text{ mm}^3$.

Fig. 43 Experimentally determined relationship between recorded maximum intensity of radiation I (kW/m^2), porosity factor ϕ ($\text{cm}^{1.1}$) and opening factor $A\sqrt{h}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). Compilation of results of tests carried out in model chamber $1000 \times 1000 \times 1000 \text{ mm}^3$.

R22: 1971

**Denna rapport avser anslag nr C 479 från Statens råd för
byggnadsforskning till Institutionen för byggnadsstatik,
LTH, Lund**

**Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, 111 84 Stockholm
Abonnemangsgrupp: k (konstruktion)**

Pris: 18 kronor